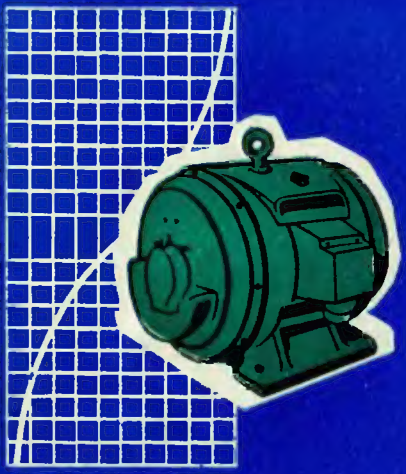
БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА



Н. М. СЛОНИМ

ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Основана в 1959 г.

Выпуск 503

Н. М. СЛОНИМ

ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

Второе издание,
переработанное и дополненное

МОСКВА
ЭНЕРГИЯ 1980

ББК 31.277.1
С 48
УДК 621.313.333.004.67.001.4

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. Н. Андриевский, Я. М. Большам, А. И. Зевакин, Е. А. Каминский, В. П. Ларионов, Э. С. Мусаэлян, С. П. Розанов, В. А. Семенов, А. Д. Смирнов, П. И. Устинов.

Слоним Н. М.

С 48 Испытания асинхронных двигателей при ремонте. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1980.— 88 с., ил. — (Б-ка электромонтера; Вып. 503).

25 к.

В книге рассмотрены испытания асинхронных электродвигателей в процессе ремонта и после его окончания. Приведены нормативные данные и методические указания по выполнению проверок, измерений и испытаний.

Первое издание книги вышло в 1970 г. Во втором издании приведены новые испытательные схемы, дано описание применяемых средств измерения, изолирующих защитных средств и приспособлений, а также основные требования по технике безопасности при испытаниях.

Книга предназначена для электрообмотчиков и электромонтеров, занятых ремонтом и испытаниями электродвигателей.

С $\frac{30307-252}{051(01)-80}$ 89-80. 2302030000 ББК 31.277.1
6П2.1.061

© Издательство «Энергия», 1980 г

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ремонт асинхронных электродвигателей производится как на централизованных специализированных электроремонтных предприятиях, так и на электроремонтных предприятиях всех отраслей народного хозяйства.

Непременным условием для обеспечения высокого качества ремонта машин является проведение при ремонте обязательного объема испытаний и измерений. В предлагаемой вниманию читателей книге рассмотрены необходимые технические характеристики электродвигателей.

Первое издание книги вышло в 1970 г.

Настоящее, второе издание дополнено новыми требованиями по току короткого замыкания отремонтированных двигателей, сведениями об особенностях испытаний отремонтированных двигателей взрывозащищенного (рудничного) исполнения, требованиями техники безопасности при ремонте. Пересмотрены также некоторые устаревшие нормативные требования.

Автор будет признателен всем читателям книги, которые пожелают сообщить свои замечания, и просит направить их по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия».

Автор

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время около 70% эксплуатируемого парка электродвигателей составляют машины, которые были капитально отремонтированы по крайней мере один раз. Естественно, что к капитальному ремонту асинхронных электродвигателей предъявляются серьезные технические требования, направленные к тому, чтобы по надежности в эксплуатации и техническим характеристикам отремонтированные машины не уступали новым машинам, выпускаемым промышленностью.

Основные указания и требования по капитальному ремонту асинхронных электродвигателей общепромышленного применения изложены в ведомственных технических условиях Министерства электротехнической промышленности: ТУ 16-519.002-71 — для ремонта электрических машин в стационарных условиях и ТУ 16-519.005-71 — для ремонта их на месте установки.

Для обеспечения необходимого качества все ремонтируемые двигатели проходят ряд испытаний, которые могут быть разделены на три группы:

предремонтные испытания — перед началом ремонта;

испытания при операционном контроле (операционные испытания) — в процессе ремонта;

приемо-сдаточные испытания — после окончания ремонта.

Предремонтные испытания имеют целью определить, какие именно узлы машины являются дефектными и подлежат ремонту или замене, а в отдельных случаях выявить исправные электродвигатели, которые вообще не подлежат ремонту и поступили в ремонт по ошибке.

Операционные испытания служат для того, чтобы еще в процессе ремонта на различных его стадиях можно было выявить допущенные при ремонте неисправности, примененные дефектные материалы, узлы, детали или запасные части и своевременно выполнить необходимые исправления, так как дефекты, обнаруженные

при приемо-сдаточных испытаниях, требуют для исправления много времени и затраты больших средств.

Объем и нормы предремонтных и операционных испытаний и сроки их применения строго не регламентированы, однако практика электромашиностроительных и электроремонтных предприятий выработала соответствующие рекомендации, которые изложены в ведомственных и заводских нормалях. Методы этих испытаний не должны отличаться от указанных в ГОСТ 11828-75 «Машины электрические. Методы испытаний» и ГОСТ 7217-66 «Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 100 Вт и выше. Методы испытаний».

Предремонтные испытания и замеры включают измерения геометрических размеров узлов и деталей, механических износов и отклонений (эксцентриситет, биение, конусность и т. д.), а также в необходимых случаях электрические испытания (измерение сопротивления изоляции, проверку электрической прочности изоляции, измерение сопротивления обмоток и их частей при постоянном токе) и проверку состояния сердечника статора (определение потерь в стали).

В объем операционных испытаний при ремонте входит обычно испытание электрической прочности изоляции запасных и вновь изготовленных обмоток (катушек, стержней) как до укладки (проверяется как витковая, так и общая изоляция), так и после укладки в пазы (до соединения и пайки) и, наконец, после пайки и изолировки соединений; испытывается также электрическая прочность изоляции кронштейнов, бандажных колец, лобовых частей обмотки, стяжных и крепежных болтов (у крупных машин), контактных колец (у электродвигателей с фазным ротором). После пайки схемы производится обычно проверка правильности схемы. После пропитки и сушки проверяют также значения сопротивлений изоляции всей обмотки относительно корпуса и между фазами обмотки.

Упомянутые выше технические условия ТУ 16-519.002-71 и ТУ 16-519.005-71 устанавливают два вида испытаний асинхронных двигателей после капитального ремонта: приемо-сдаточные и типовые.

Приемо-сдаточным испытаниям подвергаются все электрические машины, отремонтированные без изменения мощности или частоты вращения, т. е. машины, у которых при ремонте сохранены электрические и маг-

нитные нагрузки; машины, отремонтированные с изменением мощности или частоты вращения, подвергаются типовым испытаниям. Очевидно, типовым испытаниям должны также подвергаться машины, поступившие в ремонт без заводских щитков и выпущенные из ремонта с номинальными данными, определенными расчетом, выполненным ремонтной организацией.

В объем приемо-сдаточных испытаний асинхронных двигателей после ремонта входит:

измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса электродвигателя и между обмотками (фазами);

измерение сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;

обкатка электродвигателей на холостом ходу;

определение тока и потерь холостого хода;

определение тока и потерь короткого замыкания;

испытание междувитковой изоляции обмоток на электрическую прочность;

испытание изоляции обмоток относительно корпуса электродвигателя и между обмотками (фазами) на электрическую прочность;

определение коэффициента трансформации (для электродвигателей с фазным ротором).

Если ремонт крупных электродвигателей (мощностью 100 кВт и выше) производится на месте установки, то при приемо-сдаточных испытаниях кроме обкатки на холостом ходу должно производиться опробование под нагрузкой в течение 24 ч.

В объем типовых испытаний асинхронного двигателя после ремонта входят кроме всех указанных выше контрольных испытаний также испытания на нагревание, на кратковременную перегрузку по току и испытание при повышенной скорости вращения (только при замене обмотки ротора или бандажей).

Кроме того, при типовых испытаниях по методике, указанной в ГОСТ 7217-66, определяют значения к.п.д., коэффициента мощности, скольжения, максимального вращающего момента, а для двигателей с короткозамкнутым ротором определяют также минимальный вращающий момент в процессе пуска, начальный пусковой вращающий момент и начальный пусковой ток.

Технические требования к отремонтированным электродвигателям в отношении значений испытательных

напряжений, сопротивления изоляции, предельных допускаемых температур, к.п.д., коэффициента мощности, начального максимального и минимального моментов, начального пускового тока и т. п. должны соответствовать ГОСТ 183-74, ГОСТ 13859-68 и другим стандартам на соответствующие типы асинхронных электродвигателей, а методика испытаний определяется ГОСТ 11828-75 и ГОСТ 7217-66.

Последовательность проведения испытаний, указанная выше, не является обязательной, однако в требованиях стандартов указывается, что испытанию изоляции обмоток на электрическую прочность относительно корпуса машины, между обмотками и между витками должны предшествовать при приемо-сдаточных испытаниях измерение сопротивления изоляции, определение тока и потерь короткого замыкания и испытание при повышенной скорости вращения (если оно производится), а при типовых испытаниях — также испытание при кратковременной перегрузке по току; при типовых испытаниях, кроме того, испытания при повышенной частоте вращения должны производиться непосредственно после испытания на нагревание.

При всех испытаниях для измерения электрических величин должны применяться измерительные приборы необходимого класса точности; в частности, применяемые электроизмерительные приборы (с шунтами и добавочными резисторами), мосты, измерительные трансформаторы тока и напряжения при типовых испытаниях должны быть класса точности не ниже 0,5. Исключение допускается для измерения сопротивления изоляции, когда применяются обычные мегаомметры, а также для измерения мощности в трехфазной сети одним трехфазным ваттметром (допускается применять трехфазный ваттметр класса точности не ниже 1,0).

При массовых контрольных испытаниях, выполняемых на специальных стендах, допускаются приборы класса точности 1,0, однако и в этих случаях применение приборов класса точности 0,5 желательно.

Для обеспечения необходимой точности измерений измерительные приборы следует подбирать так, чтобы измеряемые значения электрических величин находились в пределах 20—95% шкалы. Особенно важно правильно выбрать однофазные ваттметры для измерения мощности в трехфазных цепях по методу двух ваттметров; необхо-

димо, чтобы одновременно измеряемые токи и напряжения составляли не меньше 20% номинальных токов и напряжений применяемых ваттметров. Если при испытаниях производятся измерения по нескольким приборам, необходимо отсчеты показаний всех проборов производить одновременно. Ниже при рассмотрении отдельных испытаний приведены схемы соединения измерительных приборов.

Обычно при испытаниях крупных асинхронных электродвигателей, отремонтированных на месте установки, собирают в каждом отдельном случае временные испытательные схемы. На стационарных электроремонтных предприятиях и в электроремонтных цехах, как правило, оборудуются испытательные отделения и участки с постоянными испытательными схемами.

В настоящее время организован промышленный выпуск нескольких типов комплектных испытательных установок, предусматривающих возможность проведения всех испытаний при ремонте различного электрического оборудования. Комплектные установки для операционного контроля и приемо-сдаточных испытаний отремонтированных асинхронных электродвигателей разработаны институтом по ремонту и эксплуатации тракторов и сельскохозяйственных машин (ГОСНИТИ) совместно с Раазикусским опытным ремонтным заводом объединения «Эстсельхозтехника» Совета Министров Эстонской ССР и выпускаются этим заводом.

Установки операционного контроля предназначены для проведения промежуточных испытаний в процессе капитального ремонта трехфазных асинхронных электродвигателей напряжением до 380 В мощностью до 40 кВт; одна установка может обеспечить испытание 30 000—40 000 электродвигателей в год (при двухсменной работе).

Выпускаются два типа установок для операционного контроля: УПК-1 — для ремонтируемых электродвигателей после укладки и пайки обмоток (до пропитки) и УПК-2 — для испытаний ремонтируемых электродвигателей после пропитки и сушки обмоток (до сборки).

Каждый стенд размещается на производственной площади 5 м² и обслуживается двумя рабочими, потребляемая мощность стенда составляет 1 кВт.

Комплектный контрольно-испытательный стенд типа КИУ-1 предназначен для послеремонтных приемо-сда-

точных испытаний асинхронных электродвигателей напряжением до 380 В и мощностью до 40 кВт. В установке предусмотрена возможность нагрузочных испытаний. Производительность стенда — 10 000 электродвигателей в год при работе в две смены, потребляемая мощность — до 70 кВ·А, обслуживающий персонал — 2 чел. Установка требует для размещения 25 м^2 площади.

Выпускаются и полуавтоматические испытательные стенды для приемо-сдаточных испытаний отремонтированных машин, в которых переход от одного испытания к последующему происходит автоматически; в частности, имеется испытательный стенд ИС-5, разработанный производственным объединением «Севкавэлектроремонт» (Ростов-на-Дону) Всесоюзного промышленного объединения «Союзэлектроремонт». Большого распространения такие испытательные стенды пока не получили, хотя на крупных электроремонтных предприятиях с большим выпуском организация таких испытательных станций весьма целесообразна.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗОРОВ

При ремонте электродвигателей, у которых демонтирована обмотка и отсутствует заводской паспорт, восстановление обмоточных данных производится расчетным путем на основании снятых с натуры размеров электродвигателя.

Неправильные или недостаточно точные замеры могут повлечь за собой серьезные осложнения вплоть до полной непригодности перемотанного электродвигателя. Поэтому, несмотря на кажущуюся простоту, работы по обмеру электродвигателя требуют достаточного внимания. Каждое измерение должно повторяться 2—3 раза, чтобы была полная уверенность в правильности результатов. Рекомендуется сопровождать измерения поясняющими эскизами. Перед измерениями необходимо тщательно очистить электродвигатель от грязи, пыли и масла и продуть его сжатым воздухом, непрочно приставшие частицы краски и лака удалить ножом или шабером.

Ниже приводятся некоторые общие рекомендации по проведению измерений.

Длину сердечника статора и ротора измеряют масштабной линейкой, прикладываемой ко дну паза статора или ротора. Измерение по головкам зубцов может дать неверные результаты; по торцам сердечника крайние зубцы обычно расходятся, образуя так называемый «веер». Следует иметь в виду, что длины сердечников статора и ротора могут несколько отличаться друг от друга.

Внешний диаметр сердечника статора и внутренний диаметр сердечника ротора не всегда доступны для непосредственного измерения, так как перед пакетами стали могут быть расположены нажимные (торцевые) шайбы и кольцевые шпонки (замки), фиксирующие шайбы. В этих случаях приходится прибегать к косвенным измерениям; например, замерив высоту спинки статора и высоту зубца, определяют внешний диаметр пакета $D_{внешн}$ из соотношения

$$D_{внешн}=D_{внутр}+2h_{сп}+2h_{зуб},$$

где $D_{внутр}$—внутренний диаметр статора (диаметр расточки); $h_{сп}$—высота спинки статора; $h_{зуб}$—высота зубца статора.

Аналогично путем косвенных измерений определяется внутренний диаметр сердечника ротора. Внутренний диаметр стали ротора многих электродвигателей малой мощности можно определить по диаметру вала, так как для них часто применяют насадку листов стали непосредственно на вал — без промежуточной крестовины.

Размеры и площадь пазов. Размеры пазов следует снимать после тщательной расчистки поверхности пазов от остатков изоляции и лака, которые не всегда удается удалить при общей чистке электродвигателя. В зависимости от формы пазов применяют те или иные мерительные инструменты — штангенциркуль, масштабные линейки, калибры и т. п.

При необходимости в определении размеров паза сложной формы наиболее совершенным является снятие с паза оттиска. Для этого вырезают четыре пластинки из листового свинца толщиной 2—3 мм и площадью, достаточной для перекрытия двух-трех пазов. Пластинки прикладывают к торцам сердечника и сжимают массивной полосой с помощью стяжного болта, как это указано на рис. 1.

При затягивании гайки стяжного болта свинец вдавливается в пазы, и на поверхности пластинки получается достаточно четкий оттиск паза, размеры которого измеряют чертежным инструментом. По снятым размерам вычерчивают паз и вычисляют его площадь.

Наиболее распространенные формы пазов и расчетные формулы для определения их площади приведены на рис. 2.

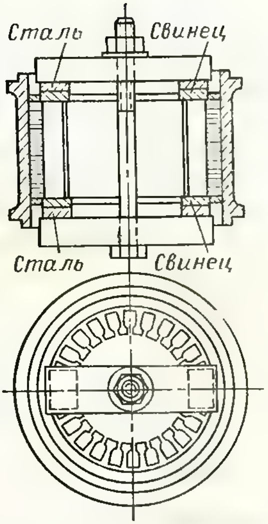


Рис. 1. Снятие оттисков пазов статора.

Воздушный зазор, т. е. зазор между статором и ротором, имеет существенное значение для эксплуатационных параметров электродвигателя. Увеличение воздушного зазора против номинального влечет за собой повышение тока холостого хода, уменьшение коэффициентов мощности и полезного действия. Ориентировочно каждый процент увеличения зазора влечет за собой повышение тока холостого хода на 0,6% и снижение коэффициента мощности на 0,3%. При увеличении зазора на 15—20% электродвигатель можно перематывать по новым обмоточным данным (с увеличенным числом витков в пазу), а при увеличении больше чем на 20% экономическая целесообразность ремонта становится сомнительной.

Увеличение воздушного зазора может быть вызвано проточкой внутренней поверхности статора или наружной поверхности ротора при предыдущем ремонте электродвигателя, что является совершенно недопустимым. Кроме того, описаны случаи [1], когда у отдельных электродвигателей, установленных на металлургическом заводе, после 15—20 лет эксплуатации воздушный зазор увеличился на 50—100% из-за шлифующего действия пыли, содержащейся в охлаждающем воздухе. Другой причиной увеличения зазоров является неправильное хранение электродвигателей на складе, при котором корродируют поверхности стали сердечников статора и ротора.

Учитывая, что в асинхронных двигателях абсолютная величина воздушного зазора невелика (например, для большинства электродвигателей единой серии типов А, АЛ, АО и АОЛ мощностью до 2,8 кВт номинальный зазор не превышает 0,3 мм), измерение его следует производить с максимально возможной точностью.

Помимо величины имеет существенное значение степень неравномерности зазора. Для асинхронных двигателей неравномерность зазора (определяемая как отно-

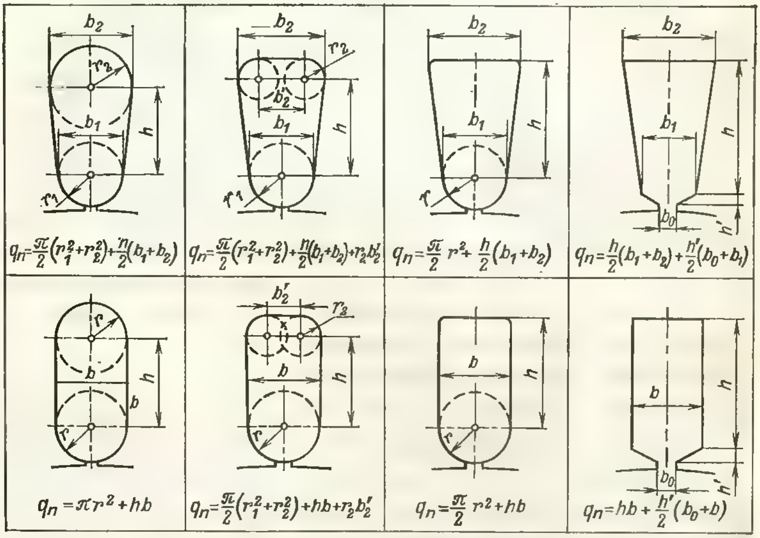


Рис. 2. Наиболее распространенные формы пазов.

шение зазора в данной точке к средней величине зазора) должна лежать в ограниченных пределах; отклонение от среднего значения не должно превышать ±10%. Неравномерность зазора обычно является следствием выработки подшипников и реже — следствием эллиптичности ротора или статора. У крупных электродвигателей значительная разница зазоров в вертикальной и горизонтальной плоскостях может быть вызвана деформацией (провисанием) статора при недостаточно жесткой станине.

В собранном электродвигателе замер зазора следует производить с двух сторон (со стороны расположения схемы и со стороны, противоположной схеме) с по-

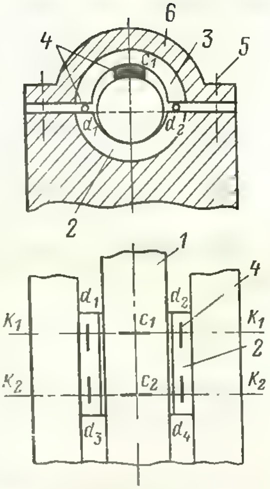


Рис. 3. Измерение зазоров в разъемном подшипнике.

1 — вал; *2* — нижний вкладыш; *3* — верхний вкладыш; *4* — свинцовая проволока; *5* — ось стяжного болта; *6* — крышка подшипника.

мощью щупа, вводимого через смотровые или специальные люки в торцевых щитах. С каждой стороны замер производят в четырех точках, сдвинутых относительно друг друга по окружности на 90°. Величину зазора определяют как среднеарифметическую величину всех замеров.

Некоторые электродвигатели, главным образом малой мощности, не имеют отверстий или люков, в которые можно ввести щуп. В таких двигателях измерение зазоров производят после их разборки. Для этого ротор укладывают непосредственно на расточки статора и замеряют зазор δ_1 напротив самой верхней точки расточки статора. Вслед за тем ротор поворачивают на 90° и вновь замеряют зазор δ_2 напротив той же точки статора; средний зазор определяют по формуле

$$\delta_{ср} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{4}.$$

Допустимые значения воздушного зазора приведены в табл. 1.

З а з о р ы в п о д ш и п н и к а х. В разъемных подшипниках скольжения радиальный вертикальный зазор измеряют по оттискам отрезков свинцовой проволоки диаметром 0,5—1,0 мм и длиной 2—4 см, закладываемых между шейкой вала и верхней половиной вкладыша, а также в плоскость разъема вкладышей. После снятия крышки подшипника и верхней половины вкладыша в места, указанные на рис. 3, укладывают отрезки свинцовой проволоки. Затем верхнюю половину вкладыша и крышку подшипника устанавливают на свои места и равномерно затягивают стяжными болтами. При подтягивании болтов отрезки свинцовой проволоки сплющиваются соответственно зазорам. Подшипник вновь разбирают и микрометром замеряют толщину всех свинцо-

вых оттисков. Зазор по линии K_1K_1 определяют по формуле

$$\delta_1 = C_1 - \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

Зазор по линии K_2K_2 будет:

$$\delta_2 = C_2 - \frac{d_3 + d_4}{2}.$$

Расчетный вертикальный зазор принимают по формуле

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}.$$

Значения δ_1 и δ_2 не должны различаться между собой больше чем на 10%.

Таблица 1

Частота вращения, об/мин	Воздушный зазор, мм, для двигателя мощностью, кВт (ориентировочно)									
	До 0,2	0,2—1,0	1,0—2,5	2,5—5,0	5,0—1,0	10—20	20—50	50—100	100—200	200—300
500—1500	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,65	0,80	1,00
3000	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	0,65	0,80	1,00	1,25	1,50

Таблица 2

Диаметр вала, мм	Зазор, мм, при частоте вращения, об/мин		
	До 1000	1000—1500	Свыше 1500
18—30	0,04—0,093	0,06—0,13	0,14—0,28
30—50	0,05—0,112	0,075—0,16	0,17—0,34
50—80	0,065—0,135	0,095—0,195	0,2—0,4
80—120	0,08—0,16	0,12—0,235	0,23—0,46
120—180	0,1—0,195	0,15—0,285	0,26—0,52
180—260	0,12—0,225	0,18—0,30	0,3—0,6
260—360	0,14—0,25	0,21—0,38	0,34—0,68
360—500	0,17—0,305	0,25—0,44	0,38—0,76

Радиальный зазор в неразъемных подшипниках скольжения измеряют щупом, вводимым между шейкой вала и вкладышем. При измерении щуп следует вводить на всю длину вкладыша.

Допустимые радиальные вертикальные зазоры в подшипниках скольжения указаны в табл. 2.

В подшипниках качения радиальные зазоры измеряют щупом, который вводят между обоймой и телом качения (шариком, роликом). Измерения зазоров можно производить также индикаторами часового типа, установленными на специальном штативе, в котором жестко закрепляется подшипник.

Таблица 3

Диаметр вала, мм	Минимальный зазор, мм		Максимальный зазор, мм
	Шарикоподшипники	Роликоподшипники	
20—30	0,005	0,01	0,10
35—50	0,010	0,02	0,15
55—80	0,015	0,03	0,20
85—120	0,020	0,04	0,30

Таблица 4

Мощность двигателя, кВт	Минимальный зазор, мм	Максимальный зазор, мм
До 10	0,4	1,0
10—20	0,5	1,5
20—40	0,75	2,0
40—80	1,0	3,0
80—160	1,5	4,0
160—500	2,0	5,0

Допустимые радиальные зазоры в подшипниках качения приведены в табл. 3.

Боковые радиальные зазоры в подшипниках скольжения допускаются в пределах половины вертикальных зазоров.

Осевой зазор в подшипниках качения не должен превышать 0,2—0,35 мм. Для подшипников скольжения допустимые осевые зазоры указаны в табл. 4.

3. ИСПЫТАНИЕ АКТИВНОЙ СТАЛИ СТАТОРА

Целью испытания активной стали является проверка отсутствия замыкания между листами и вызванных этими замыканиями местных перегревов. Испытание также дает возможность оценить потери в стали, и та-

ким образом, определить исправность всего сердечника в собранном виде. Его производят индукционным методом при вынутом роторе по схеме, приведенной на рис. 4, при магнитной индукции в спинке статора $B=1$ Тл, создаваемой намагничивающей обмоткой, накладываемой на сердечник статора. Для контроля индукции в спинке и э. д. с. намагничивающей обмотки на сердечник накладывают также контрольную обмотку. При испытании частота переменного тока должна составлять 50 Гц.

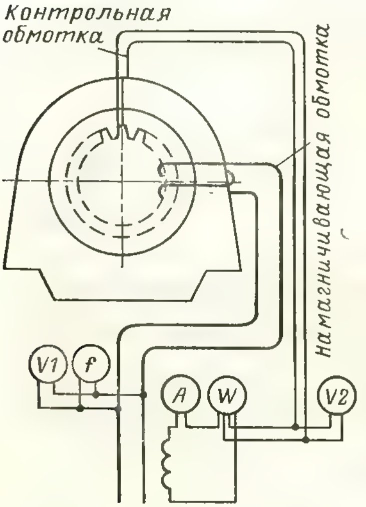


Рис. 4. Схема испытания активной стали.

Намагничивающая и контрольная обмотки выполняются проводом ПР или ПРГ. Допускается также применение обмоточного провода, дополнительно изолированного пропитанной в лаке хлопчатобумажной лентой. При отсутствии провода необходимого сечения намагничивающая обмотка может быть выполнена из нескольких параллельных проводов. Применение освинцованного или бронированного кабеля недопустимо. Во избежание повреждений изоляции провода обмотку следует накладывать на прокладки из дерева или электрокартона, уложенные поверх корпуса статора. На время испытания корпус статора следует надежно заземлить проводом сечением не менее 50 мм².

Число витков намагничивающей обмотки определяется по формуле

$$w_{в}=\frac{45U_1}{Q},$$

где U_1 — напряжение, подключаемое при испытании к концам намагничивающей обмотки, В; $Q=(l-nb_в)h_{сп}k_{ст}$ — поперечное сечение спинки статора, см; n — число вентиляционных каналов; $b_в$ — ширина

вентиляционных каналов, см; $k_{ст}$ — коэффициент заполнения стали (табл. 5); $h_{сп}$ — высота спинки, см.

Величина $h_{сп}$, см, определяется по формуле

$$h_{сп} = \frac{D_{внешн} - D_{внутр}}{2} - h_{зуб}.$$

Размеры $D_{внешн}$, $D_{внутр}$, b_s и $h_{зуб}$ показаны на рис. 5. Если через спинку статора проходят стяжные болты, высота спинки статора (рис. 6) определяется по формуле

$$h_{сп} = \frac{D_{внешн} - D_{внутр}}{2} - h_{зуб} - d_{отв}.$$

Если число витков окажется дробным, надо принять ближайшее целое число.

Таблица 5

Вид изоляции	Коэффициент заполнения стали при толщине стали, мм	
	0,5	0,35
Оклейка бумагой	0,90	0,87
Лакировка	0,93	0,91
Без изоляции или оксидная изоляция	0,95	0,93

При выборе источника питания для намагничивающей обмотки следует учитывать, что более высокое напряжение позволяет применить обмотки с большим числом витков и, следовательно, более близким к расчетному значению.

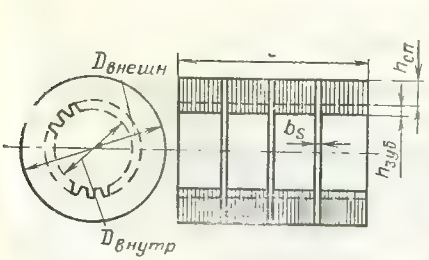


Рис. 5. Размеры активной стали.

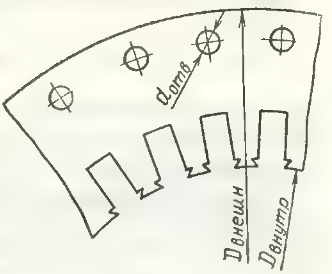


Рис. 6. Размеры спинки сталя.

Ток, потребляемый намагничивающей обмоткой для создания индукции 1 Тл, не может быть заранее подсчитан с желательной точностью, так как зависит от марки и качества стали и от конструкции сердечника, в частности от наличия стыков в разъемах статора и между сегментами пакета.

Несмотря на вызываемую этими обстоятельствами неизбежную неточность, значение тока в намагничивающей обмотке следует заранее вычислить хотя бы приближенно, так как это необходимо для выбора сечения провода обмотки и измерительных приборов (пределов измерения амперметра и ваттметра).

Для приближенного вычисления тока, А, в намагничивающей обмотке служит формула

$$I_1 = \frac{0,033\,(D_{\text{внешн}} - h_{\text{сп}})\,F}{w_1},$$

где $h_{\text{сп}}$ — высота спинки, см; F — удельная м. д. с., А/м, равная 200—250 для повышеннолегированной и высоколегированной сталей и 450—500 для слаболегированной и среднелегированной сталей.

В обоих случаях большее значение относится к статорам с числом сегментов более четырех и разъемным статорам. Допускаемый ток нагрузки для намагничивающей обмотки в зависимости от сечения провода приведен ниже:

Сечение провода, мм²	6	10	16	25	35	50
Ток нагрузки, А	30	45	60	85	105	130

Мощность, необходимая для питания намагничивающей обмотки, кВ·А,

$$P_{\text{исп}} = 0,001 I_1 U_1.$$

Число витков контрольной обмотки

$$w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1},$$

где U_2 — напряжение на зажимах контрольной обмотки, которое выбирается из условия удобного отсчета показаний по шкале установленного вольтметра.

Намагничивающая обмотка присоединяется к источнику питания через отдельные предохранители и двухполюсный рубильник, которые должны быть выбраны исходя из значений тока, потребляемого намагничивающей обмоткой.

При проведении испытания предварительно следует

произвести пробное включение намагничивающей обмотки и проверить напряжение на зажимах контрольной обмотки, которое не должно значительно отличаться от расчетного значения.

Необходимо следить за тем, чтобы при испытании частота тока в сети поддерживалась равной 50 Гц. Если это невозможно обеспечить, испытание стали следует отложить на время, когда нагрузка сети будет снижена (ночное время, выходные дни и т. д.).

Следует иметь в виду, что напряжение на зажимах контрольной обмотки U_2 пропорционально магнитной индукции в стали и, если это напряжение отличается от расчетного, магнитная индукция не будет равна 1 Тл. Значение магнитной индукции при испытании может быть определено по формуле $B=kU_2$, где $k=45/Qw_2$.

Через 10 мин после начала испытания напряжение следует снять, проверить на ощупь нагрев стали по всей расточке статора и, выбрав наиболее холодный зубец, заложить в него термопары или термометры, затем включить напряжение и через 10 мин вновь снять его, на ощупь определить зубцы, имеющие повышенный нагрев, и также установить в них термопары или термометры. Остальные термометры или термопары устанавливают равномерно по расточке и длине активной стали. При этом на участках активной стали, подвергавшихся ранее ремонту, закладка термометров или термопар обязательна. После закладки термопар или термометров включают напряжение и в течение 90 мин ведут прогрев стали статора. В процессе прогрева через каждые 10 мин записывают температуру в журнале.

Испытание стали следует немедленно прекратить, отключив намагничивающую обмотку, если во время испытания температура какой-либо точки активной стали статора достигнет 100°С, а также при появлении дыма и искр из какого-либо участка стали статора или намагничивающей обмотки.

Состояние активной стали статора считается нормальным, если удельные потери не превосходят 2,5 Вт/кг для повышеннолегированной и высоколегированной сталей и 5,5 Вт/кг для слаболегированной и среднелегированной сталей, если через 90 мин после начала испытаний максимальный перегрев стали относительно температуры окружающего воздуха не превысит 45°С и если максимальная разность температур между отде-

льными зубцами по истечении 90 мин после начала испытаний не превысит 25°С.

Подсчет удельных потерь в стали, Вт/кг, производится по формуле

$$P_0 = \frac{40k_{\text{тр}} \frac{w_1}{w_2} P_{\text{в}}}{Q\,(D_{\text{внешн}} - h_{\text{сп}})},$$

где $P_{\text{в}}$ — показание ваттметра, Вт, без учета $k_{\text{тр}}$; $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трансформации трансформатора тока.

Когда индукция B в спинке не равна 1 Тл (U_2 не равно расчетному), действительное значение удельных потерь должно быть пересчитано по формуле

$$P_1 = P_0 \left(\frac{U_{2\text{р}}}{U_2}\right)^2,$$

где P_0 — удельные потери при испытании; $U_{2\text{р}}$ и U_2 — расчетное и действительное напряжения контрольной обмотки.

Место испытания огораживают, около него устанавливают предостерегающие плакаты. В процессе испытания прикасаться к статору нельзя. Все наблюдения следует вести, не прикасаясь к приборам.

4. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Материалы, применяемые при изоляции обмоток электродвигателей, не являются идеальными диэлектриками и в зависимости от своих физико-химических свойств являются в большей или меньшей степени токопроводящими. Сопротивление изоляции обмоток помимо конструкции самой изоляции и примененных материалов в значительной степени зависит также от влажности изоляции, механических повреждений и загрязнения поверхности.

О сопротивлении изоляции судят по значению проходящего через нее тока при приложении постоянного напряжения. Сопротивление изоляции измеряют мегаомметром с ручным или электрическим приводом либо сетевым мегаомметром, а также методом вольтметра.

Как известно, сопротивление изоляции измеряется в омах, но так как в обмотках двигателей оно обычно

очень велико, то принято его выражать в миллионах ом (мегаомах), откуда и происходит название прибора. Мегаомметр (рис. 7) представляет собой генератор постоянного тока, к выводам которого подсоединяется измеряемое сопротивление. Мегаомметр по существу фиксирует ток, проходящий через измеряемое сопротивление, но для удобства пользования шкала его измерительного прибора отградуирована непосредственно в мегаомах.

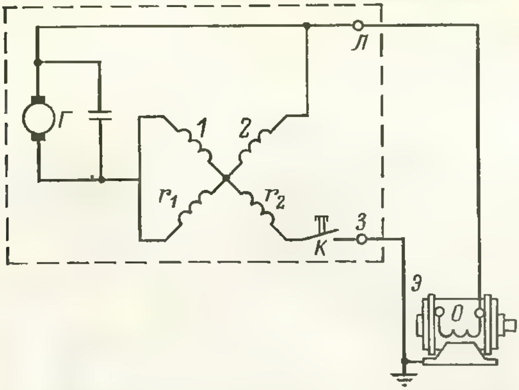


Рис. 7. Принципиальная схема мегаомметра.

Г — генератор постоянного тока; *1* — последовательная обмотка мегаомметра; *2* — параллельная обмотка мегаомметра; r_1, r_2 — ограничивающие сопротивления; *Л* — линейный зажим; *3* — зажим для присоединения заземления; *К* — кнопка включения; *Э* — корпус электродвигателя; *О* — обмотка электродвигателя.

В качестве измерительного прибора в мегаомметре применяется логометр, в котором взаимодействуют две обмотки — обмотка *1*, соединенная последовательно с измеряемым сопротивлением, и обмотка *2*, подключенная параллельно выводам генератора. Перед измерением производится упрощенная проверка мегаомметра: при вращении ручки и замкнутых накоротко зажимах мегаомметра показание прибора должно быть равно нулю, при разомкнутых — бесконечности. Обмотку перед измерением сопротивления ее изоляции на 1—2 мин заземляют для того, чтобы могущие быть в ее изоляции остаточные заряды стекли в землю и не повлияли на результаты испытания.

Провода, соединяющие мегаомметр с испытуемой обмоткой, а также с корпусом электродвигателя, должны иметь усиленную и надежную изоляцию. Ручку мегаом-

метра следует вращать по возможности равномерно, частота вращения должна быть около 150 об/мин. После разворота ручки мегаомметра до указанной частоты вращения включают кнопку *К* и тем самым испытуемая обмотка подключается к генератору мегаомметра. В мегаомметрах, у которых кнопки нет, после разворота ручки провод от зажима *Л* подключают к обмотке электродвигателя щупом (стальная острозаточенная игла с изолированной ручкой из текстолита или эбонита).

В начале замеров стрелка прибора делает бросок к началу шкалы, затем показание прибора медленно начинает увеличиваться и через некоторое время (15—60 с) стрелка устанавливается в некотором положении. Первоначальный бросок стрелки, соответствующий повышенному току генератора мегаомметра, вызывается зарядным током, определяемым емкостью изоляции, который быстро затухает. Относительно медленное движение стрелки после спада емкостного тока определяется токами абсорбции.

Изоляция не является монолитной, ее можно рассматривать состоящей из ряда слоев, т. е. последовательно соединенных емкостей. При приложении напряжения внутренние емкости в этой цепочке заряжаются через сопротивление предшествующих. При хорошей, сухой изоляции сопротивление каждого слоя велико и зарядный ток мал. Поэтому процесс заряда происходит медленно. При сырой изоляции процесс протекает быстро и также быстро стрелка прибора достигает своего максимального значения.

Установившееся показание прибора свидетельствует об окончании зарядки внутренних слоев изоляции (при этом ток абсорбции равен нулю). Это показание определяется только так называемым током сквозной проводимости, т. е. током, проходящим внутри изоляции по капиллярам, заполненным влагой, и током, проходящим по наружной поверхности изоляции, которая всегда в некоторой степени загрязнена и увлажнена.

Таким образом, судить о состоянии изоляции следует по значению тока сквозной проводимости и по скорости спадания тока абсорбции, которая определяется коэффициентом абсорбции

$$k_{абс}=\frac{R_{60}}{R_{15}},$$

где R_{15} и R_{60} — сопротивления изоляции, отсчитанные соответственно через 15 и 60 с после достижения мегаомметром полной частоты вращения.

При хорошей, сухой изоляции коэффициент абсорбции составляет 1,5—2,0, а для увлажненной приближается к единице. Минимальной нормой следует считать $k_{абс}=1,3$.

Сопротивление изоляции электрической машины относительно ее корпуса и сопротивление изоляции между обмотками при рабочей температуре должно быть не менее значения, получаемого по формуле, но не менее 0,5 МОм:

$$R = \frac{U}{1000 + 0,01P},$$

где U — номинальное напряжение машины, В; P — номинальная мощность машины, кВт.

Сопротивление изоляции сильно зависит от температуры; с увеличением температуры оно снижается, а при уменьшении температуры повышается. Поэтому, если измерение сопротивления изоляции производится при температуре ниже рабочей, полученное по приведенной формуле сопротивление изоляции следует удваивать на каждые 20°С (полные или неполные) разности между рабочей температурой и той температурой, при которой выполнено измерение. Практически у электродвигателей с высушенной и неповрежденной изоляцией обмотки значение сопротивления изоляции всегда бывает выше нормируемого.

Примененное выше выражение «рабочая температура машины» нуждается в разъяснении.

Рабочей температурой любой части машины называют практически установившуюся температуру этой части, соответствующую номинальному режиму работы машины при неизменной температуре окружающей среды. Очевидно, что каждый тип и типоисполнение электродвигателя имеют свою рабочую температуру; она зависит от конструкции двигателя и его вентиляции, расчетных нагрузок и расчетной температуры охлаждающей среды и может быть приближенно определена тепловым расчетом, выполняемым при проектировании электродвигателя (или серии электродвигателей).

Определенная расчетом рабочая температура позволяет выбрать конструкцию изоляции двигателя и класс ее нагревостойкости (о классах нагревостойкости см.

в § 15) таким образом, чтобы была обеспечена длительная работа электродвигателя при номинальном режиме. Поэтому по классу нагревостойкости изоляции, примененной в исполнении завода-изготовителя, можно судить о рабочей температуре электродвигателя. Эти сведения приведены ниже.

Класс нагревостойкости изоляции . .	A	E	B	F	H
Принимаемая рабочая температура электродвигателя, °C	100	110	120	140	165

ГОСТ 11828-75 предписывает применять при измерении сопротивления изоляции обмоток электродвигателей с номинальным напряжением до 500 В включительно мегаомметр на 500 В и для электродвигателей напряжением выше 500 В — мегаомметр на 1000 В. Рекомендуется применять мегаомметры, которые приводятся во вращение не вручную, а приводным электродвигателем. Помимо облегчения проведения испытаний это значительно повышает точность результатов.

Для электродвигателей, у которых выведены концы и начала всех фаз, измерение сопротивления изоляции производят между каждой фазой и корпусом. В этом случае допустимое минимальное сопротивление изоляции фазы должно быть повышено в 3 раза.

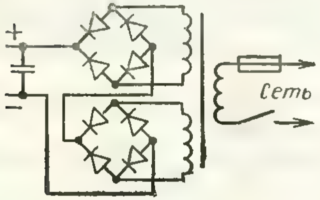
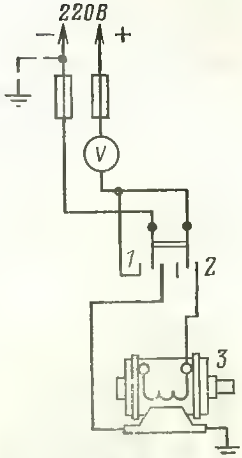


Рис. 8. Схема сетевого мегаомметра с полупроводниковыми диодами.

При измерении сопротивления изоляции каждой из электрических цепей все прочие цепи соединяют с корпусом машины. По окончании измерения сопротивления изоляции каждой электрически независимой цепи следует разрядить ее на заземленный корпус двигателя. Для обмоток на номинальные напряжения 3000 В и выше продолжительность разрядки для двигателей до 1000 кВт не менее 15 с и для электродвигателей мощностью более 1000 кВт — не менее 1 мин.

На рис. 8 представлена другая схема сетевого мегаомметра, где вместо кенотрона применены полупро-

Рис. 9. Измерение сопротивления изоляции вольтметром при питании от сети постоянного тока.



водниковые диоды. Это делает сетевой мегаомметр более компактным, легким и более надежным в эксплуатации.

Схема соединения при измерении сопротивления изоляции методом вольтметра при питании от сети постоянного тока приведена на рис. 9.

При измерении предварительно фиксируют напряжение питающей сети U_1, для чего переключатель ставят в положение *1*. Затем переключатель переводят в положение *2* и замеряют показание вольтметра U_2. Так как при этом положении рубильника сопротивление вольтметра $R_в$ (указанное на шкале вольтметра или приведенное в его паспорте) и измеряемое сопротивление R соединены последовательно, то падение напряжения в них будет распределяться прямо пропорционально значениям их сопротивлений.

Падение напряжения в вольтметре составит U_2, В, а в изоляции $U_1—U_2$, В. Таким образом,

$$\frac{R_в}{R}=\frac{U_2}{U_1-U_2};$$

$$R=R_в\frac{U_1-U_2}{U_2}=R_в\left(\frac{U_1}{U_2}-1\right).$$

Для получения большей точности измерений вольтметр выбирают с большим собственным сопротивлением. Измерения можно производить не только от стационарной сети постоянного тока, но и от аккумуляторной батареи.

При измерении от электросети, один полюс которой может быть заземлен (на рис. 9 обозначено пунктиром), во избежание короткого замыкания следует подключать заземленный корпус электродвигателя *3* таким образом, чтобы он оказался соединенным с заземленным полюсом сети.

Наряду с питанием от источника постоянного тока можно применить для измерения также выпрямленный ток. На рис. 10 представлена схема измерения сопротивления изоляции при питании от сети переменного тока. Эта схема отличается от приведенной на рис. 9 наличием трансформатора *3* и выпрямителя *4*. При питании выпрямленным током, если выпрямитель включен в сеть не непосредственно, а через трансформатор, отделяющий сеть переменного тока от цепи выпрямленного напряжения (как это указано на рис. 10), заземленный корпус электродвигателя может быть присоединен к любому из зажимов выпрямителя.

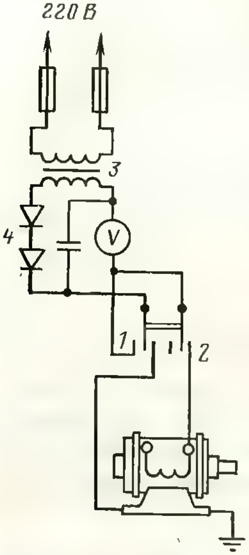


Рис. 10. Измерение сопротивления изоляции вольтметром при питании от сети переменного тока.

При ремонтах электродвигателей, связанных с переизолировкой активной стали, возникает необходимость проверить качество лаковой пленки после нанесения лака на листы и его запечки. Одним из показателей служит сопротивление постоянному току изоляции из отлакированных листов стали. В этом случае измерение сопротивления производят на приспособлении, изображенном на рис. 11.

Пачку из 20 отлакированных листов *1* сжимают между электродами *2* и *3*. Площадь каждого электрода составляет 1 дм^2. Под электродом *3* устанавливают изолирующую подкладку *4*. Листы сжимают рычагом с подвешенным на его конце грузом *5*, который подбирается таким образом, чтобы давление, оказываемое на пачку листов, составляло 6000 Н (удельное давление 0,6 МПа). При указанных условиях сопротивление изоляции должно быть не менее 50 Ом.

Источником питания могут являться аккумуляторная батарея или выпрямитель напряжением 10—15 В. Потенциометром *6* устанавливают ток 0,1 А, при этом показание вольтметра должно быть не менее 5 В. Для предохранения амперметра от повреждения в цепь вклю-

чают защитное сопротивление 7. Значение защитного сопротивления R, Ом, выбирают таким образом, чтобы при случайном коротком замыкании электродов 2 и 3 ток, проходящий через амперметр, не превосходил предельного значения, на которое рассчитан амперметр, т. е.

$$R \geqslant \frac{U}{I_{\text{амп}}},$$

где U — напряжение источника питания, В; $I_{\text{амп}}$ — предельный ток амперметра, А.

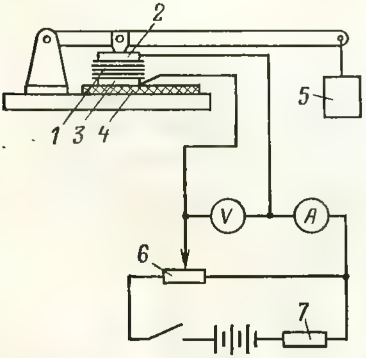


Рис. 11. Приспособление для измерения сопротивления изоляции листов активной стали.

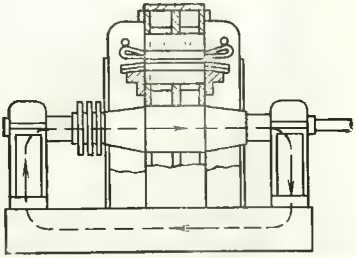


Рис. 12. Контур подшипниковых токов.

При эксплуатации крупных электродвигателей под влиянием магнитной асимметрии или по некоторым другим причинам в замкнутом контуре (подшипники, вал, фундаментная плита), указанном на рис. 12, может возникнуть электрический ток. Этот ток разъедает шейки вала и вкладыши подшипников, из-за чего работа подшипников ухудшается и они быстро выходят из строя.

Для предотвращения возникновения этих токов указанный замкнутый контур разрывают установкой изолирующей текстолитовой или гетинаксовой прокладки между фундаментной плитой и подшипниковой стойкой. Болты, крепящие стойку к плите, изолируют изоляционными втулками и шайбами. При принудительной смазке подшипников во фланцах маслопровода устанавливают изоляционные прокладки и втулки.

В процессе эксплуатации и при ремонте установленную изоляцию необходимо периодически проверять — измерять сопротивления изоляции между подшипниковой стойкой и фундаментной плитой при полностью собранном маслопроводе мегаомметром на 500—1000 В.

Как видно на рис. 12, сопротивление изоляции не может быть проверено в собранном электродвигателе, так как изолированному подшипнику параллельна цепь, составленная валом, другим неизолированным подшипником и фундаментной плитой. Для измерения необходимо приподнять вал и заложить прокладку из электрокартона между шейкой вала и вкладышем неизолированного подшипника. Значение сопротивления не является нормируемым, но должно находиться на достаточно высоком уровне — не ниже 1 МОм, так как оно очень быстро и значительно снижается при загрязнении прокладок.

При ремонте, а также при эксплуатации крупных двигателей, температуру нагрева которых измеряют заложенными в обмотку термодетекторами, необходимо периодически измерять сопротивление изоляции этих термодетекторов, так как нарушение ее может представить серьезную опасность для обслуживающего персонала. Проверку производят мегаомметром на 250 В. Значение сопротивления не является нормируемым; показательным является его сравнение с результатами предыдущих измерений.

5. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ПРИ ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

При измерении сопротивления обмоток при постоянном токе имеют значение не только абсолютная величина сопротивления и соответствие ее расчетной, но и симметричность сопротивлений отдельных фаз. Одинаковое, но значительно отличающееся от расчетного значение сопротивления каждой фазы может быть вызвано ошибкой в числе витков катушки, применением провода, отличающегося сечением от расчетного, либо отличием средней длины витка от расчетной. Разные значения сопротивлений отдельных фаз могут быть следствием многих причин — ошибок в схеме соединения катушек и катушечных групп, витковых замыканий

и плохого качества паек. Допустимое отклонение фактического значения сопротивления от расчетного можно принять равным ±2%, а допустимое значение расхождения сопротивления отдельных фаз — не более 2% среднего значения сопротивления фаз.

Измерение сопротивления обмоток при постоянном токе производят по методу амперметра — вольтметра, а также электрическими мостами. Измеряют обмотки при их практически холодном состоянии (температура

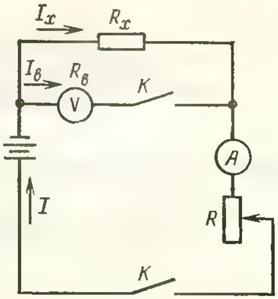


Рис. 13. Метод амперметра — вольтметра.

I_x — ток в измеряемом сопротивлении; $I_в$ — ток в ветви вольтметра; I — ток по амперметру; R_x — измеряемое сопротивление; $R_в$ — сопротивление вольтметра; K — рубильник; R — добавочное регулируемое сопротивление.

любой части электродвигателя отличается от температуры окружающей среды не более чем на 3°С). Температуру окружающего воздуха замеряют не менее чем в трех местах на расстоянии 1—2 м от электродвигателя. Термометры нужно располагать на уровне оси электродвигателя в местах, защищенных от потоков воздуха, создаваемых другими электродвигателями, вентиляторами или случайными причинами. За расчетную температуру принимают среднюю из показаний термометров. Схема подключения измеряемого сопротивления, источника питания и приборов приведена на рис. 13. В качестве источника питания может быть применена аккумуляторная батарея, создающая в обмотке ток до 20% номинального. Время включения тока при каждом измерении не должно превышать 1 мин.

Во избежание повреждения вольтметра импульсами э. д. с. при резком изменении тока в цепи измерения необходимо сначала включить нижний рубильник (у аккумуляторной батареи) при отключенном верхнем рубильнике (у вольтметра); этот рубильник включают только тогда, когда ток в измеряемом сопротивлении установится. Регулировку производят с помощью доба-

вочного сопротивления.

Искомое значение R_x определяется следующим образом:

$$I_x=\frac{U}{R_x};\quad I_в=\frac{U}{R_в},$$

где U — замеренное напряжение, В; $R_в$ — внутреннее сопротивление вольтметра, Ом; I_x — ток, проходящий через сопротивление R_x, А; $I_в$ — ток, проходящий через вольтметр, А.

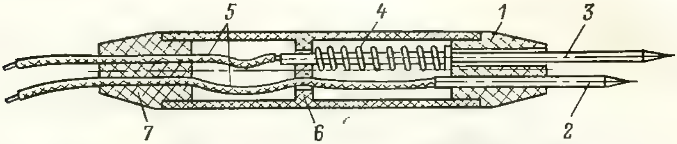


Рис. 14. Сдвоенный щуп для измерения сопротивлений.

Ток аккумуляторной батареи

$$I=I_x+I_в=\frac{U}{R_x}+\frac{U}{R_в}.$$

Преобразуя последнее выражение, находим:

$$R_x=\frac{U}{I-\frac{U}{R_в}}.$$

Когда сопротивление вольтметра превосходит измеряемое сопротивление более чем в 100 раз, отношение $U/R_в$ мало по сравнению с I и можно с достаточной точностью принять, что $R_x=U/I$.

При сборке схемы следует обратить особое внимание на надежность контактных соединений самой схемы. В частности, чтобы исключить влияние переходного сопротивления контактов, при измерении сопротивления обмотки ротора цепь вольтметра следует подключать не к поводкам постоянно смонтированных щеток, а непосредственно к контактным кольцам через специальные щетки.

Для раздельного подключения к испытуемому сопротивлению цепей вольтметра и амперметра иногда применяют специальные сдвоенные щупы (рис. 14). Щупы имеют по две иглы — неподвижную *2*, ввинченную или запрессованную в текстолитовый наконечник *1*, и подвижную *3*, свободно проходящую через наконеч-

ник и отжимаемую пружиной *4*. Игла *3* соединена с помощью проводника *5* с амперметром, а игла *2* — с вольтметром. Щуп заключен во втулку *6*, закрытую изолятором *7*.

При подсоединении щупов (рис. 15) сначала с измеряемым сопротивлением соприкасаются подвижные иглы, а затем при дальнейшем нажатии на щупы — неподвижные. При снятии щупов вначале разрывается

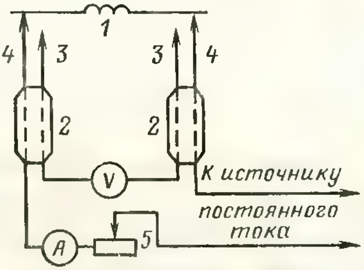


Рис. 15. Подключение сдвоенных щупов.

1 — измеряемое сопротивление; *2* — сдвоенные щупы; *3* — неподвижные иглы щупа; *4* — подвижные иглы щупа; *5* — реостат.

цепь вольтметра, потом уже цепь тока. Тем самым вольтметр предохраняется от толчков э. д. с., возникающих при размыкании тока.

Следует отметить, что при пользовании обычными щупами (иглой с изолированной ручкой) пришлось бы применить четыре щупа и, следовательно, занять работой два человека. При пользовании сдвоенными щупами ту же работу может выполнить один человек.

При измерении сопротивлений обмоток электродвигателя, если выведены только три выводных конца обмотки (глухое соединение), следует замерить сопротивление между каждой парой выводных концов (R_{1-2}, R_{2-3}, R_{3-1}). Если эти сопротивления равны, то сопротивление каждой фазы (R_1, R_2, R_3,) составляет:

при соединении в звезду (рис. 16)

$$R_1 = R_2 = R_3 = 0{,}5R_{1-2} = 0{,}5R_{2-3} = 0{,}5R_{3-1};$$

при соединении в треугольник (рис. 17)

$$R_1 = R_2 = R_3 = 1{,}5R_{1-2} = 1{,}5R_{2-3} = 1{,}5R_{3-1}.$$

Если замеренные сопротивления на выводах различаются между собой, то сопротивление каждой фазы составляет:

при соединении в звезду

$$R_1=0{,}5(R_{1-2}+R_{1-3}-R_{2-3});$$

$$R_2=0{,}5(R_{1-2}+R_{2-3}-R_{3-1});$$

$$R_3=0{,}5(R_{1-3}+R_{2-3}-R_{1-2});$$

при соединении в треугольник

$$R_1=\frac{2R_{2-3}R_{3-1}}{R_{2-3}+R_{3-1}-R_{1-2}}-0{,}5(R_{2-3}+R_{3-1}-R_{1-2});$$

$$R_2=\frac{2R_{3-1}R_{1-2}}{R_{3-1}+R_{1-2}-R_{2-3}}-0{,}5(R_{3-1}+R_{1-2}-R_{2-3});$$

$$R_3=\frac{2R_{1-2}R_{2-3}}{R_{1-2}+R_{2-3}-R_{3-1}}-0{,}5(R_{1-2}+R_{2-3}-R_{3-1}).$$

Замеры сопротивления обмоток производят при значениях тока 10, 15 и 20% номинального[1]. За расчетное принимают среднее из трех измерений. Измеренные сопротивления различных фаз обмоток статора и ротора не должны отличаться друг от друга более чем на ±2% среднего значения, а от ранее измеренных или от заводских данных — более чем на 2%.

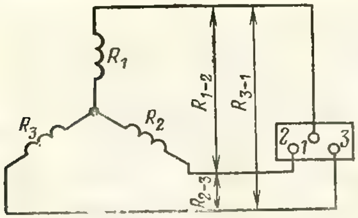


Рис. 16. Измерение сопротивления обмотки при соединении фаз в звезду.

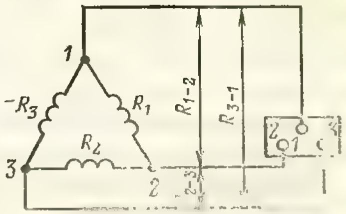


Рис. 17. Измерение сопротивления обмотки при соединении фаз в треугольник.

С большой точностью измерение сопротивления обмоток при постоянном токе можно производить электрическими мостами. Как известно, принцип действия моста состоит в том, что измеряемое сопротивление R_x и три известных регулируемых резистора R_1, R_2 и R_3 включают таким образом, чтобы образовался замкну-

[1] Измерение при токе, большем 20% номинального, может привести к искажению результатов из-за нагревания измеряемого сопротивления.

тый четырехугольник. К двум диагонально расположенным углам четырехугольника прикладывают напряжение от источника постоянного тока — обычно от аккумуляторной батареи, а к двум другим углам четырехугольника подключают чувствительный гальванометр, у которого нулевое положение стрелки расположено посередине шкалы.

Подбором сопротивлений R_1, R_2 и R_3 можно добиться того, чтобы через гальванометр не проходил ток. Это возможно, если произведения противоположно расположенных сопротивлений равны между собой, т. е.

$$R_x R_2 = R_1 R_3.$$

Отсюда следует, что

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}.$$

Этот простой одинарный мост пригоден для измерения сравнительно большого сопротивления обмоток мелких двигателей, поскольку измеряется фактически искомое сопротивление самих обмоток и сопротивление соединительных проводов и контактов, которым при сравнительно большом сопротивлении обмоток можно пренебречь. Применение одинарного моста ограничено измерением сопротивлений 1 Ом и более.

Более универсальным, пригодным для измерения сопротивлений как больших, так и менее 1 Ом, является двойной мост Томпсона, при измерении которым сопротивление соединительных проводов и контактов практически не имеет значения. Однако эти мосты громоздки и дороги.

По конструктивному исполнению в зависимости от способа, подбора и регулировки переменных сопротивлений мосты разделяются на штепсельные, рычажные и линейные (струнные).

В штепсельных мостах (рис. 18) включение переменных резисторов производят при установке штепселей в гнезда, к которым присоединены эти переменные резисторы. При хорошей подгонке штепселей к гнездам можно добиться очень точных результатов измерений. Недостатком штепсельных мостов является большая затрата времени при производстве замеров.

В рычажных мостах (рис. 19) включение переменных резисторов достигается перемещением рычага по набору контактов, к которым подключены пере-

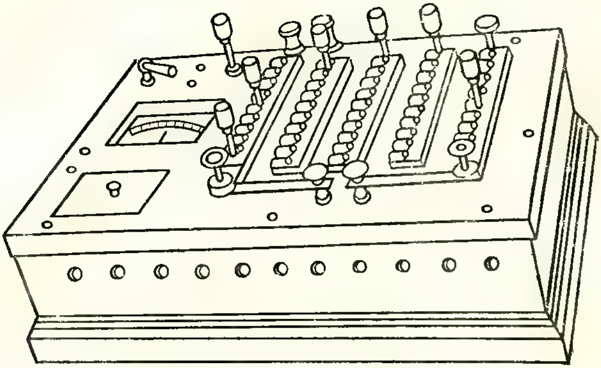


Рис. 18. Штепсельный мост.

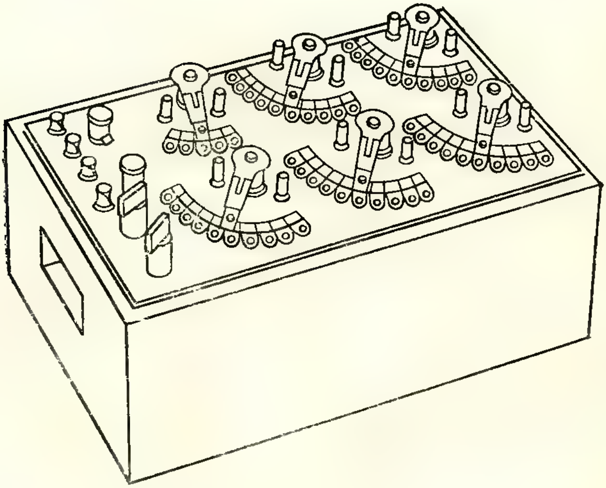


Рис. 19. Рычажный мост.

менные резисторы. При чистых хороших контактах точность измерений на рычажных мостах не уступает точности измерений на штепсельных мостах при значительно более высокой скорости замеров.

В линейных мостах каждый из переменных резисторов выполнен в виде проволоки (струны) из материала, обладающего высоким удельным сопротивле-

нием, по которой может передвигаться подвижный контакт (нож). В некоторых конструкциях (рис. 20) струна располагается по окружности. В линейных мостах в зависимости от положения подвижного контакта изменяется соотношение переменных сопротивлений. Линейные мосты являются самыми дешевыми, работа на них так же быстра, как и на рычажных мостах, однако точность измерений ниже, чем на других типах мостов. Применяются линейные мосты только для измерений, не требующих высокой точности.

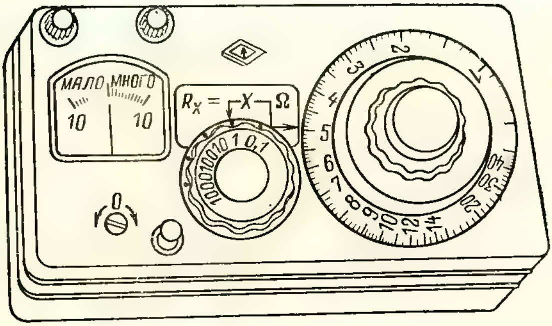


Рис. 20. Линейный мост.

Как известно, сопротивление проводника при постоянном токе зависит от материала проводника, его размеров и его температуры. Расчетные значения сопротивлений обмоток обычно относят к температуре 15°С, и, если измерение сопротивления производилось при другой температуре, то его пересчитывают к значению, соответствующему 15°С.

Например, сопротивление медного проводника при температуре t_1, °С, равно R_{t1}, Ом. При температуре t_2, °С, оно составит:

$$R_{t_2} = R_{t_1} \frac{235 + t_2}{235 + t_1}.$$

Сопротивление медного проводника, Ом, отнесенное к 15°С, составит:

$$R_{15} = R_{t1} \frac{250}{235 + t_1}.$$

Для алюминиевых проводов зависимость сопротивления, Ом, от температуры определяется соотношением

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{245 + t_2}{245 + t_1};$$

сопротивление, отнесенное к 15°С, составит:

$$R_{15} = R_{t1} \frac{260}{245 + t_1}.$$

6. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ СХЕМЫ И НАЛИЧИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ПОЛЯ

Эта проверка относится к операционным испытаниям. После укладки всех катушек обмотки производят необходимые соединения схемы. Обычно перед окончательной пайкой схемы проверяют ее правильность. При этом обмотку статора включают на пониженное трехфазное напряжение (24 или 36 В), после чего на расточку статора кладут шарик (от подшипника качения), который под действием магнитного поля статора будет вращаться по поверхности расточки с равномерной скоростью по направлению вращения поля. Если скорость вращения шарика не будет равномерной или шарик будет останавливаться, то это является признаком неправильности схемы или наличия короткозамкнутых витков.

Еще лучше проверять наличие вращающегося поля с помощью простого приспособления, состоящего из шарикоподшипника с внутренним диаметром 6 мм и наружным 15 мм, закрепленного на деревянной ручке, проходящей через центральное отверстие шарикоподшипника, с помощью текстолитовой (гетинаксовой) шайбы и шурупа.

Приспособление держат за ручку и обводят им окружность расточки на небольшом расстоянии от поверхности. Если схема обмотки правильна, то под действием вращающегося поля наружное кольцо подшипника будет при обходе вращаться с равномерной скоростью в одну сторону. При неправильной схеме соединения обмотки скорость и направление вращения наружного кольца шарикоподшипника бу-

дут колебаться, а при наличии в обмотке короткозамкнутых витков кольцо в соответствующем месте остановится. Этим же приспособлением можно проверить и правильность соединения обмотки фазного ротора до окончательной пайки схемы, при этом обмотку ротора включают на пониженное трехфазное напряжение и приспособление обводят вокруг поверхности ротора на небольшом расстоянии от нее.

7. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ОТНОСИТЕЛЬНО КОРПУСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И МЕЖДУ ОБМОТКАМИ

Электрическая прочность изоляции обмоток в первую очередь обусловливает эксплуатационную надежность электродвигателя. С течением времени изоляция обмоток под влиянием происходящих в ней электрических и химических процессов, а также тепловых и механических нагрузок ухудшает свои электроизоляционные и механические свойства.

При ремонте двигателей, связанном с перемоткой обмоток, испытание электрической прочности изоляции необходимо производить после каждой технологической операции, так как повреждение изоляции может произойти на любом этапе ремонта. Время приложения испытательного напряжения должно быть достаточным для выявления дефектов в изоляции. ГОСТ 183-74 устанавливает длительность испытания 1 мин. Более продолжительное испытание может привести к повреждению изоляции даже при отсутствии дефектов в ней.

Уровень испытательных напряжений должен быть таким, чтобы можно было выявить все дефектные места в изоляции (трещины, смещения, проколы и т. п.), но исправная изоляция при этом не должна повреждаться.

Испытание электрической прочности изоляции обмоток двигателей производят после измерения сопротивления изоляции и только при удовлетворительных показателях замера. Сильная увлажненность или загрязненность изоляции могут оказаться причиной ее пробоя при испытании высоким напряжением. В тех случаях, когда в полный объем испытаний

входят испытание при повышенной частоте вращения и испытание при кратковременной перегрузке по току, эти испытания также должны предшествовать испытанию электрической прочности изоляции.

Если у двигателя выведены начала и концы всех фаз обмотки, испытанию подвергают каждую фазу; две другие фазы подключают к корпусу двигателя, который при этом заземляют. В тех случаях, когда концы и начала фаз отдельно не выведены, испытывают всю обмотку по отношению к заземленному корпусу. При испытании один полюс источника испытательного напряжения подключают к заземленному корпусу двигателя. Заземлять корпус двигателя необходимо, иначе при пробое изоляции обмоток он окажется под тем же электрическим потенциалом, что и полюс источника испытательного напряжения. Также на случай повреждения изоляции обмоток источника испытательного напряжения корпус его должен быть заземлен.

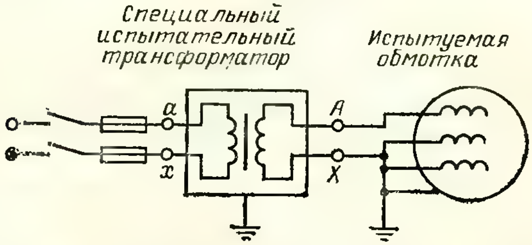


Рис. 21. Схема включения испытательного трансформатора.

Испытание производят напряжением переменного тока частотой 50 Гц с помощью специального трансформатора, имеющего устройство для плавного регулирования напряжения и измерительную аппаратуру. На рис. 21 указана схема включения трансформатора. При отсутствии специального испытательного трансформатора могут быть использованы трансформаторы аппарата для испытания трансформаторного масла или от кенотронной испытательной установки. Схема включения этих трансформаторов приведена на рис. 22, где *T1* — испытательный трансформатор; *T2* — измерительный трансформатор, предназначенный для контроля испытательного напряжения. Обмотки высокого напряжения этих трансформаторов соединены параллельно.

При пробое испытуемой изоляции обмотка высокого напряжения трансформатора окажется замкнутой накоротко, вследствии чего напряжение на ее выводах резко снизится. Также снизится напряжение, показываемое вольтметром *V2*, и возрастет ток в амперметре *А*. В небольших испытательных установках для упрощения схемы и уменьшения количества трансформаторов и измерительных приборов трансформатор *Т2* и

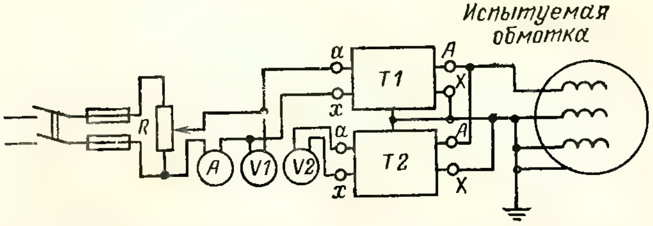


Рис. 22. Схема включения измерительного трансформатора при испытании обмотки.

вольтметр *V2* не устанавливают. В этих случаях значение испытательного напряжения определяют по вольтметру *V1* умножением его показания на коэффициент трансформации испытательного трансформатора. О повреждении — пробое изоляции в этом случае судят по увеличению показаний амперметра и некоторому снижению показаний вольтметра.

Измерение испытательного напряжения до 3 кВ допускается производить вольтметром с добавочным резистором.

При испытании изоляции обмоток с номинальным напряжением 6 кВ и выше для машин мощностью более 2000 кВ·А параллельно объекту испытания рекомендуется подключать шаровой разрядник с пробивным напряжением, не более чем на 10% превышающим испытательное напряжение. В цепи шарового разрядника должно быть включено сопротивление для ограничения тока короткого замыкания, возникающего при пробое разрядника.

Согласно требованиям стандартов испытание должно производиться практически синусоидальным напряжением. Поэтому питание испытательного трансформатора должно быть от линейного напряжения сети, а не от фазного, так как последнее более отличается от си-

Таблица 6

Объект испытания	Мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение		
			до укладки	после укладки, но до пайки	после соединения и пайки
Катушки статоров электродвигателей	До 1000	До 6600	4500 В + 2,75 U	2500 В + 2,5 U	2000 В + 2,25 U
Роторные стержни асинхронных электродвигателей, втулки контактных колец	Реверсивные двигатели Нереверсивные двигатели	До 2400 До 2400	3000 В + 4 $U_к$ 3000 В + 2 $U_к$	2000 В + 4 $U_к$ 2000 В + 2 $U_к$	1500 В + 4 $U_к$ 1500 В + 2 $U_к$
Всыпные обмотки статоров электродвигателей	До 1 От 1 до 7 От 10 до 100	До 500 До 660 До 660	— — —	1000 В + 2 U 1500 В + 2 U 2000 В + 2 U	750 В + 2 U 1200 В + 2 U 1700 В + 2 U

Примечания: 1. Испытательные напряжения пазовой изоляции катушек, оставшихся в пазах после удаления поврежденных катушек, составляют 2000 В для двигателей до 525 В, проработавших до 10 лет, и 1800 В для двигателей, проработавших 10 лет и более, 2U для двигателей 3 кВ и выше, проработавших до 10 лет, и 1,7 U для двигателей, проработавших 10 лет и более.

2. Испытательные напряжения пазовой изоляции катушек, демонтированных из пазов, составляют 2700 В для двигателей до 525 В, проработавших до 10 лет, и 2500 В для двигателей, проработавших 10 лет и более, 2,7 U для двигателей 3 кВ и выше, проработавших до 10 лет, и 2,5 U для двигателей, проработавших 10 лет и выше.

3. U—номинальное напряжение двигателя, В; $U_к$—напряжение на кольцах при разомкнутом неподвижном роторе и номинальном напряжении на статоре, В.

Таблица 7

Обмотка двигателя	Мощность	Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение
Обмотка статора асинхронного двигателя	До 1 кВт (или 1 кВ·А)	До 100	500 В + 2U
	1 кВт (или 1 кВ·А) и выше	До 100	1000 В + 2 U
	До 1000 кВт (или 1000 кВ·А)	Выше 100	1000 В + 2 U, но не менее 1500 В
	1000 кВт (или 1000 кВ·А) и выше	Выше 100 до 3300 включительно	1000 В + 2 U
		Выше 3300 до 6600 включительно	2,5 U
		Выше 6600	3000 В + 2 U
Обмотка фазного ротора двигателя	Любая	Любое	1000 В + 2 $U_К$

Примечания: 1. Значение испытательного напряжения относится к машинам, перемотанным на специализированных электроремонтных заводах (цехах) или на месте установки. При испытании после установки (перед сдачей в эксплуатацию) новых или полностью перемотанных на специализированном электроремонтном предприятии машин электрическую прочность изоляции испытывают напряжением, равным 80% указанного.

2. U—номинальное напряжение двигателя, В; $U_К$—напряжение на кольцах при разомкнутом неподвижном роторе и номинальном напряжении на статоре, В.

нусоидального, чем линейное. Следует также учесть, что емкость испытуемой обмотки искажает кривую напряжения тем значительней, чем сильней насыщена сталь испытательного трансформатора и чем меньше его мощность. Из этих соображений мощность испытательного трансформатора должна быть не менее 1 кВ·А на каждый киловольт его напряжения. Если мощность одного трансформатора окажется недостаточной, следует включить параллельно два (или более) трансформатора, при этом обмотки низкого и высокого напряжений трансформаторов соединяют параллельно. Если же недостаточно напряжения одного трансформатора, то трансформаторы включаются последовательно (обмотки низкого напряжения трансформаторов соединяются параллельно, а обмотки высокого напряжения — последовательно).

Испытания следует начинать при напряжении, составляющем около одной трети испытательного, затем плавно в течение не менее 10 с надо производить подъем напряжения до полного испытательного. Последнее выдерживают в течение 1 мин, после чего его плавно снижают до одной трети и затем отключают. Испытуемую обмотку соединяют с корпусом электродвигателя и тем самым разряжают. Последнее необходимо потому, что при хорошем состоянии изоляции в ней сравнительно долго может сохраняться электрический заряд, и прикосновение к обмотке опасно.

Испытательные напряжения, применяемые при операционном контроле при ремонте электродвигателя, приведены в табл. 6, а применяемые при приемо-сдаточных испытаниях для капитально отремонтированных и вновь вводимых в эксплуатацию электродвигателей, прошедших восстановительный ремонт или реконструкцию, — в табл. 7.

8. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МЕЖДУВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК

В обмотках двигателей переменного тока замыкание между витками является одним из самых серьезных дефектов, обычно приводящих к выходу двигателя из строя.

11006 22

По наружному осмотру обычно невозможно распознать, имеются ли в катушках короткозамкнутые витки. Если число короткозамкнутых витков невелико, то это нельзя обнаружить измерением сопротивления при постоянном токе, так как такое замыкание мало отражается на значении сопротивления всей фазы, и его изменение может лежать в пределах допуска на отклонение сопротивления между фазами обмотки. Однако при включении двигателя под нагрузку короткозамкнутые витки будут вести себя как замкнутая накоротко вторичная обмотка трансформатора с малым сопротивлением. Вследствие относительно большого значения проходящего тока перегреваются медь (алюминий) и изоляция дефектных и прилегающих к ним витков.

Испытание витков изоляции предусматривается ГОСТ 183-74 для собранных двигателей и производится после испытания на повышенную частоту вращения (если это испытание должно производиться). Подведенное напряжение повышают на 30% сверх номинального и выдерживают в течение 3 мин: у двигателей с фазным ротором — при разомкнутой обмотке ротора, у короткозамкнутых двигателей — при холостом ходе. Если при напряжении 130% номинального ток холостого хода превышает номинальный, длительность испытания снижают до 1 мин.

У двигателей с разомкнутым и неподвижным фазным ротором при подведении к обмотке статора трехфазного напряжения, повышенного на 30% сверх номинального, испытывают одновременно междувитковую изоляцию обмоток статора и ротора.

Однако у некоторых двигателей с фазным ротором и малым числом полюсов при таком испытании потребляемый ток намного превосходит номинальное значение, что вызывает опасное повышение температуры обмотки статора, бандажей и т. д.; у таких машин допускается раздельное испытание междувитковой изоляции обмоток статора и ротора: сначала производят испытание для обмотки статора при замкнутом накоротко и вращающемся роторе повышением подведенного к обмотке статора напряжения до 130% номинального, а затем — для обмотки ротора (при разомкнутой обмотке ротора и вращении с номинальной частотой посторонним двигателем против направления вращения поля статора) подведением к обмотке статора напряжения,

составляющего 65% номинального. При таком испытании наведенное в обмотке ротора напряжение будет составлять 130% номинального.

Для уменьшения тока холостого хода при испытании междувитковой изоляции обмоток допускается одновременно с повышением напряжения на 30% повышать и частоту питающего тока; если испытание проводят на вращающейся электрической машине, то повышение частоты не должно быть более 15%.

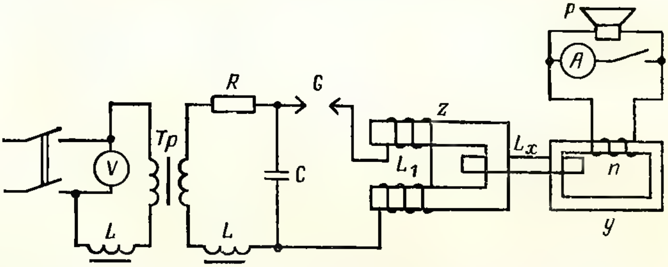


Рис. 23. Принципиальная схема установки для испытания катушек индукционным методом.

Рекомендуемое ГОСТ 183-74 испытание все же недостаточно гарантирует надежность двигателя, так как при его эксплуатации могут иметь место значительно более высокие перенапряжения. В связи с этим обмотки крупных двигателей высокого напряжения, которые не являются всыпными, а изготовляются заранее, проверяют на отсутствие замыканий в процессе и по окончании их изготовления (до укладки в пазы).

Для испытания междувитковой изоляции катушек до укладки их в пазы применяются установки, позволяющие возбуждать в них высокие напряжения индукционным методом при частоте 10—100 кГц. Принципиальная схема такой установки показана на рис. 23.

Установка питается от повышающего трансформатора *Тр*, к первичной обмотке которого подводится регулируемое напряжение (от потенциал-регулятора), и состоит из колебательного контура — конденсатора *C*, индуктивности *L*, искрового разрядника *G*, катушки L_1, насаженной на сердечник *z* и испытываемой катушки L_x, выводы которой разомкнуты. Сигнальное устройство состоит из сердечника *y*, катушки *n*, амперметра *A* и репродуктора *P*.

Принцип действия установки следующий: при подъеме напряжения потенциал-регулятором, когда напряжение на высокой стороне трансформатора и на заряжаемом конденсаторе C достигнет такого значения, при котором будет пробит искровой промежуток разрядника, конденсатор начнет разряжаться на катушку L_1. При разряде конденсатор и катушка L_1 образуют колебательный контур; во время действия электрической дуги в искровом промежутке разрядника в колебательном контуре будут происходить высокочастотные затухающие колебания тока, создающие в сердечнике z магнитный поток высокой частоты. Этот поток в свою очередь наведет в испытываемой катушке L_x затухающие напряжения высокой частоты.

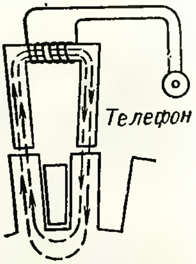


Рис. 24. Обнаружение короткозамкнутых витков подковообразным электромагнитом.

Если в разомкнутой катушке L_x нет короткозамкнутых витков, то тока в ней не будет и в сердечнике y не будет возникать магнитный поток, а следовательно, и в катушке n не будет наводиться э. д. с. При наличии в катушке L_x короткозамкнутых витков или при замыкании витков в процессе испытания в контуре катушки n возникнет ток. Отсутствие или наличие тока в катушке n фиксируется показаниями амперметра A (при включении расположенного рядом рубильника) и по отсутствию или наличию звука в репродукторе P.

Для проверки состояния междувитковой изоляции обмотки, уложенной в пазы, существует много приспособлений и аппаратов, начиная от самых примитивных — подковообразных электромагнитов и кончая современными электронными аппаратами типов ВЧФ, ЕЛ-1 и др. Аппараты типа ЕЛ-1 являются универсальными; помимо проверки уложенной обмотки на отсутствие витковых замыканий они дают возможность производить ряд других проверок и испытаний, указанных ниже.

Обнаружение короткозамкнутых витков подковообразным электромагнитом, обмотка которого питается переменным током частотой 500—1000 Гц, производится при его передвижении по окружности статора

(рис. 24). Если под электромагнитом, расположенным на зубцах, будет находиться короткозамкнутый виток, то в этом витке наведется э. д. с. и по нему пойдет ток, который можно обнаружить по звуку в телефоне или по дребезжанию пластины из тонкой жести, прикладываемой к зубцам статора, охваченным неисправной катушкой. При достаточном навыке пользование подковообразным электромагнитом позволяет безошибочно обнаружить дефекты в обмотке.

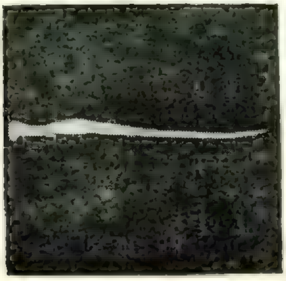


Рис. 25. Форма кривых при обмотке, не имеющей дефектов.

Рис. 26. Форма кривых при обмотке, имеющей витковые замыкания.

Аппараты типа ЕЛ-1 нашли широкое применение при эксплуатации и ремонте электродвигателей. Принцип действия аппарата, имеющего сложную, но вместе с тем и надежную схему, следующий.

К аппарату подсоединяются две обмотки, в которые поочередно посылаются импульсы напряжения высокой частоты. Если обмотки совершенно идентичны, т. е. одинаковы их полные сопротивления, то одинаковыми будут и импульсы тока. Это находит свое отображение на экране электронно-лучевой трубки: соответствующие кривые, относящиеся к двум сравниваемым обмоткам, будут сливаться. Если же в одной из обмоток будет какой-либо дефект, например витковые замыкания, неправильное число витков и др., то импульсы токов, проходящих через эти обмотки, будут различны. На экране трубки будут уже не одна, а две кривые. В качестве примера приводится форма кривых для обмотки без дефектов (рис. 25) и для обмотки, имеющей витковые замыкания (рис. 26). Каждому дефекту соответствует

своя форма кривой, которая позволяет при достаточном опыте определить характер неисправности в обмотке.

Применение аппаратов типа ЕЛ-1 позволило значительно увеличить пропускную способность испытательных станций и участков. Аппарат позволяет обнаружить в уложенной в пазы обмотке фазы имеющиеся витковые замыкания и витковые металлические замыкания в изготовленных катушках до их укладки в пазы двигателя, позволяет найти пазы, в которых уложены катушки с короткозамкнутыми витками, проверить правильность соединения схемы обмотки и сопряжения фаз. С помощью аппарата ЕЛ-1 можно обнаружить обрыв в фазах и замыкание их на корпус, проверить, одинаковое ли количество витков и одинаковое ли сечение провода в фазах, испытать на электрическую прочность междувитковую изоляцию обмоток двигателей низкого напряжения.

Надежные методы обнаружения дефектов изоляции и испытания электрической прочности междувитковой изоляции обмоток двигателей, находящихся в эксплуатации, а также при ремонтах двигателей, связанных с изготовлением и укладкой новой обмотки, стали возможными в результате создания аппаратуры, разработанной ВЭИ имени В. И. Ленина.

Наиболее распространенным, применяемым многими ремонтными службами промышленных предприятий и электростанций, а также специализированными электроремонтными предприятиями является аппарат типа С-5П-ВЭИ. Этот аппарат, состоящий из девяти блоков, может быть использован и как стационарный и как переносный.

В эксплуатируемых электродвигателях, когда нет доступа к отдельным катушкам, аппаратом С-5П-ВЭИ можно испытывать изоляцию между витками напряжением до 0,5 кВ на виток. В условиях ремонта в зависимости от числа витков в катушке испытательные напряжения могут быть доведены до 0,5—1,0 кВ на виток при обмотке, уложенной в пазы, и до 1,5 кВ на виток — до их укладки в пазы.

Принципиальная схема аппарата приведена на рис. 27. Для испытания междувитковой изоляции отдельных катушек до их укладки в пазы их закладывают в замкнутые электромагниты *ЭМ1* и *ЭМ2*. Через за-

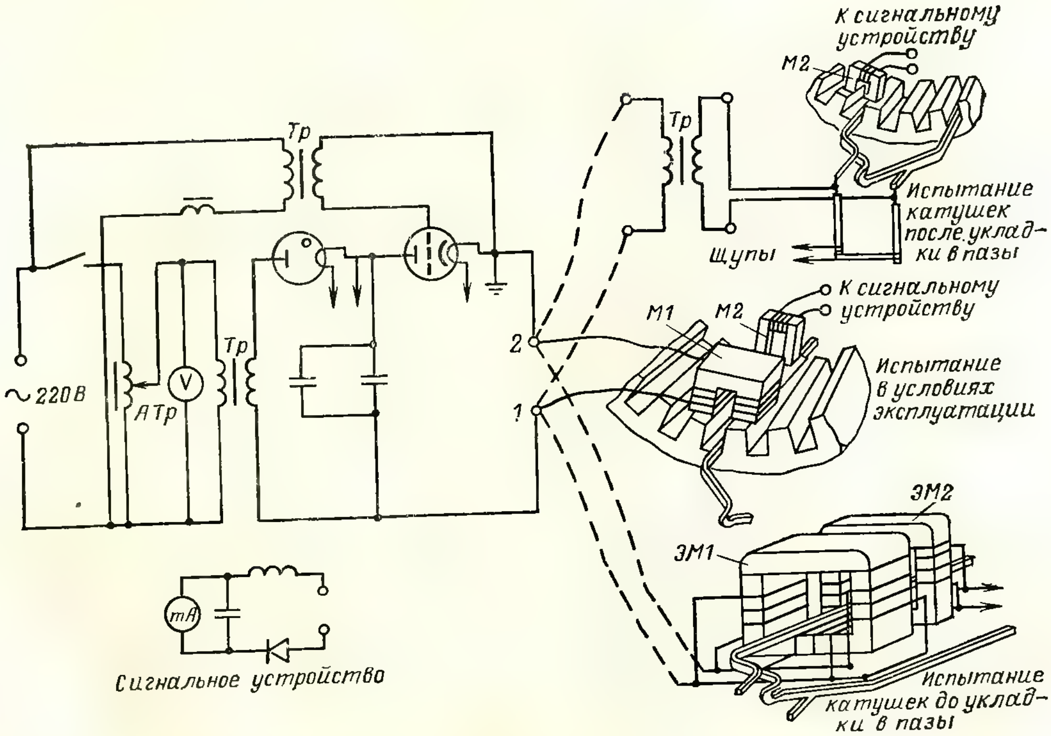


Рис. 27. Схема испытательной установки С-5П-ВЭИ.

жимы аппарата *1* и *2* к обмотке *ЭМ1* подводят высокое импульсное напряжение, а к обмотке *ЭМ2* подключают сигнальное устройство. Импульсный ток, проходящий по обмотке *ЭМ1,* создает в его магнитопроводе магнитный поток, который наводит напряжение в витках испытуемой катушки. Если в катушке нет короткозамкнутых витков, то ток в ней проходить не будет (концы катушки разомкнуты) и вокруг катушки не будет магнитного поля. Естественно также, что в магнитопроводе *ЭМ2* не будет магнитного потока, в его обмотке не наведется э. д. с. и не будет проходить ток. Таким образом, показания миллиамперметра сигнального устройства будут близки к нулю. Небольшое отклонение стрелки прибора на одно-два деления происходит из-за полей рассеяния и полей, вызванных емкостным током катушки.

Если в катушке имеются короткозамкнутые витки или замыкание витков произошло при испытании, то по этим виткам потечет ток, который создаст вокруг катушки магнитное поле и магнитные потоки в сердечниках *ЭМ1* и *ЭМ2*; поток, проходящий по *ЭМ2*, наводит в его обмотке э. д. с., и по ней потечет ток, что и будет фиксироваться миллиамперметром сигнального устройства.

Регулирование испытательного напряжения производят автотрансформатором *АТр*. При ремонте испытание междувитковой изоляции катушек, уложенных в пазы, производят импульсным напряжением через повышающий трансформатор *Тр*. Напряжение подводят специальными щупами.

При испытании П-образный электромагнит *М2* устанавливают на зубцах статора на одной из сторон испытуемой катушки. К концам обмотки *М2* подключают сигнальное устройство. При испытании катушек, не имеющих короткозамкнутых витков, по ним будет проходить импульсный ток, создающий вокруг катушки магнитное поле. Часть магнитного потока, проходя по магнитопроводу *М2,* наведет в его обмотке э. д. с., по обмотке пойдет ток, что и будет фиксироваться миллиамперметром сигнального устройства. Если же в катушке имеются короткозамкнутые витки, то проходящий по этим виткам ток короткого замыкания создает вокруг катушки размагничивающий магнитный поток (подобно вторичной обмотке трансформатора). Поэто-

му результирующий поток, проходящий через магнитопровод *М2*, и ток, регистрируемый миллиамперметром сигнального устройства, будут значительно меньше, чем при испытании катушек, не имеющих витковых замыканий.

Испытание междувитковой изоляции обмотки двигателей, находящихся в эксплуатации, производят двумя П-образными электромагнитами *М1* и *М2*, расположенными на зубцах статора над одной из сторон испытуемой катушки. Через зажимы аппарата *1* и *2* к обмотке *М1* подводят высокое импульсное напряжение, а к обмотке *М2* подключают сигнальное устройство. Ток, проходящий через обмотку *М1*, создает магнитный поток, проходящий через магнитопровод и активную сталь статора. Этот поток наводит в витках испытуемой катушки импульсное напряжение. Напряжение регулируют автотрансформатором *АТр*.

При отсутствии замыканий между витками по ним не будет проходить ток и не будет магнитного поля вокруг катушек. Поэтому в магнитопроводе *М2* не будет магнитного потока, в его обмотке не будет наводиться э. д. с., что зафиксирует миллиамперметр сигнального устройства. В том случае, если в катушке имеются короткозамкнутые витки, то проходящий по этим виткам ток создает вокруг катушек магнитное поле. Часть магнитного потока, проходя по магнитопроводу *М2*, наведет в его обмотке э. д. с., и по ней пойдет ток, что и будет фиксироваться миллиамперметром сигнального устройства.

Рекомендуемые испытательные напряжения на один виток, В, для витковой изоляции при изготовлении катушек до их укладки в пазы приведены ниже.

Провода ПБД, ПСД, ПЭТВП, ПЭЗП	300
Провода ПСД, ПБД с прокладками между витками толщиной 0,2 мм	500
Провод голый, изолированный одним слоем микаленты 0,13 мм вполнахлеста	800
Провода ПБД, ПСД, ППЛБО, дополнительно изолированные одним слоем микаленты 0,13 мм вполнахлеста	1400

После укладки в пазы испытательные напряжения снижают на 20—25%.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Коэффициент трансформации определяют у асинхронных двигателей с фазным ротором. При неподвижном разомкнутом роторе и включенной обмотке статора асинхронный двигатель можно рассматривать как трансформатор, первичной обмоткой которого является обмотка статора, а вторичной — обмотка ротора; коэффициент трансформации составляет:

$$n = \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{р}}} = \frac{w_{\text{эф.с}}}{w_{\text{эф.р}}},$$

где $U_{\text{с}}$ — фазное напряжение обмотки статора, В; $U_{\text{р}}$ — фазное напряжение обмотки ротора, В; $w_{\text{эф.с}}$ — число эффективных (последовательно соединенных) витков в фазе обмотки статора; $w_{\text{эф.р}}$ — число эффективных витков в фазе обмотки ротора.

Согласно ГОСТ 7217-66 к электродвигателям с номинальным напряжением до 660 В к обмотке статора при измерении коэффициента трансформации подводят номинальное напряжение, а к электродвигателям с номинальным напряжением выше 660 В допускается подводить пониженное напряжение. Напряжение, наведенное в обмотке ротора, замеряют на его контактных кольцах игольчатыми щупами.

Из приведенного выше соотношения следует:

$$U_{\text{р}} = U_{\text{с}} \frac{w_{\text{эф.р}}}{w_{\text{эф.с}}}.$$

Если напряжение $U_{\text{с}}$ определено достаточно точно и нет сомнений в точности количества эффективных витков обмотки статора $w_{\text{эф.с}}$, то пониженное значение коэффициента трансформации может быть вызвано заниженным по сравнению с расчетным количеством эффективных витков обмотки статора, замыканием между витками, неправильным соединением катушек в фазе (например, при параллельном соединении катушек вместо последовательного) или неправильным соединением фаз между собой. Кроме того, некоторое понижение напряжения ротора может быть вызвано падением напряжения из-за намагничивающего тока в активном сопротивлении обмотки статора.

Так как в роторе, обмотка которого соединена в звезду, нулевая точка, как правило, недоступна и очень ча-

сто обмотка статора имеет глухое соединение фаз, то приходится удовлетворяться замером линейных напряжений с их последующим пересчетом на фазные. При этом пересчете следует учитывать, что в некоторых электродвигателях старых выпусков применялись двухфазные обмотки роторов, при которых одно из напряжений между кольцами в $\sqrt{2}$ раз больше, чем два других. В этом случае два меньших напряжения между кольцами представляют собой фазные напряжения.

При определении коэффициента трансформации за значение $U_с$ принимают среднеарифметическое значение напряжений фаз обмотки статора, а за $U_р$ — среднеарифметическое значение напряжений фаз обмотки ротора. При этом разность между отдельными напряжениями фаз обмотки ротора не должна превышать 1% их среднего значения. Повышенное отклонение свидетельствует о несимметрии фаз обмотки ротора. При стержневой обмотке это обычно бывает при ошибочном включении части стержней не в ту фазу, при катушечной обмотке — при разном числе витков в катушке.

При проведении опыта необходимо учитывать, что напряжение ротора может быть весьма велико (больше напряжения статора) и коэффициент трансформации в отдельных случаях в электродвигателях низкого напряжения может быть меньше единицы. Поэтому все измерения следует проводить с соблюдением правил техники безопасности.

Измерение коэффициента трансформации может быть применено также для проверки исправности обмотки статора. При этом первичной обмоткой является обмотка ротора, к ней подключается напряжение, обычно регулируемое в пределах от нуля до номинального напряжения ротора. Вторичной обмоткой является обмотка статора, в которой наведенное напряжение замеряется на выводах. И в этом случае заметное отклонение фазных напряжений обмотки статора от их среднего значения является признаком неисправности.

Если обмотка ротора является как бы первичной обмоткой трансформатора, а обмотка статора — вторичной, то падение напряжения от намагничивающего тока имеет место в активном сопротивлении обмотки ротора и коэффициент трансформации $n = U_с / U_р$ оказывается несколько заниженным.

Поэтому, если один раз определить коэффициент трансформации асинхронного двигателя, питая его со стороны статора, а второй раз, питая его со стороны ротора, то в первом случае, как правило, коэффициент трансформации будет несколько выше. Можно считать, что истинный коэффициент трансформации равен среднему значению этих двух измерений.

10. ОБКАТКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Обкатка на холостом ходу является обязательным сдаточным испытанием отремонтированных электродвигателей.

Обкатку обычно производят непосредственно перед опытом холостого хода, поэтому удобно подключать обкатываемый электродвигатель к схеме для опыта холостого хода (см. § 11). У фазного двигателя ротор при этом закорачивают. При обкатке электродвигатель должен проработать без нагрузки в течение времени, достаточного для того, чтобы установилось тепловое состояние электродвигателя, это время увеличивается с ростом мощности электродвигателя. Время обкатки при контрольных испытаниях в зависимости от мощности двигателя (ГОСТ 11828-75) приведено ниже:

Мощность электродвигателя, кВт . .	До 1	От 1 до 10 (вкл.)	От 10 до 100 (вкл.)	От 100 до 1000 (вкл.)	Выше 1000
Продолжительность обкатки, мин . . .	5	15	30	60	120

При типовых испытаниях время обкатки должно быть увеличено вдвое.

При обкатке должна быть проверена симметричность токов трех фаз: при практически симметричном напряжении токи должны быть симметричны (не должны отличаться более чем на $\pm 5\%$ среднего значения). Не менее важно убедиться в том, что стрелки амперметров во время обкатки не раскачиваются; качание стрелок является признаком неисправности электродвигателя, в частности обмотки или клетки короткозамкнутого ротора, а у фазного электродвигателя — и механизма короткого замыкания.

Установившиеся температуры обоих подшипников к концу обкатки не должны заметно отличаться друг от друга и не должны превышать 70°С для подшипников качения и 60°С для подшипников скольжения, температура масла при этом (в подшипниках скольжения) не должна превышать 50°С.

11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА И ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА

Ток и потери холостого хода позволяют определить к. п. д. и коэффициент мощности электродвигателя при холостом ходе $\cos \varphi_0$. Ток холостого хода не является нормируемой величиной, но многолетней практикой электромашиностроения и электроремонта установлены его предельные значения, приведенные на рис. 28 и рис. 29.

Измерение тока и потерь холостого хода после ремонта и сравнение их с соответствующими данными до ремонта позволяют обнаружить некоторые нарушения при ремонте.

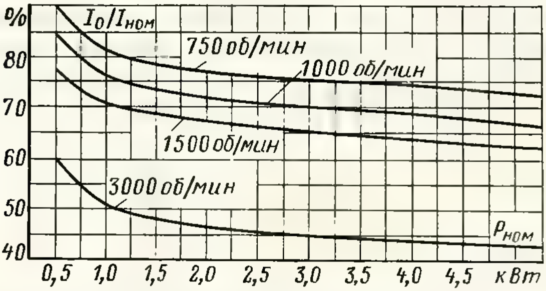


Рис. 28. Кривые предельных значений тока холостого хода трехфазных асинхронных двигателей мощностью до 5 кВт.

Увеличение тока и потерь холостого хода может быть вызвано укладкой в пазы меньшего числа эффективных витков или при недоборе листов при перешихтовке стали сердечника, а также при аксиальном смещении ротора по отношению к статору; увеличение тока холостого хода при сохранении потерь холостого хода может быть следствием увеличения воздушного зазора; увеличение потерь холостого хода при сохранении тока холостого хода может иметь место из-за механических причин, на-

пример при повышенном трении в подшипниках, плохой сборке и др.

Под холостым ходом подразумевают работу электродвигателя, подключенного к сети и не соединенного с каким-либо механизмом.

В электродвигателях с фазным ротором при опыте холостого хода обмотку ротора замыкают накоротко на кольцах. Подводимое к статору напряжение должно иметь номинальную частоту и быть практически симметричным.

Характеристики холостого хода представляют собой зависимости линейного тока I_0 и потерь холостого хода P_0 от приложенного напряжения U_0. Величина P_0 является разностью между подводимой мощностью P_1 и потерями в измерительных приборах.

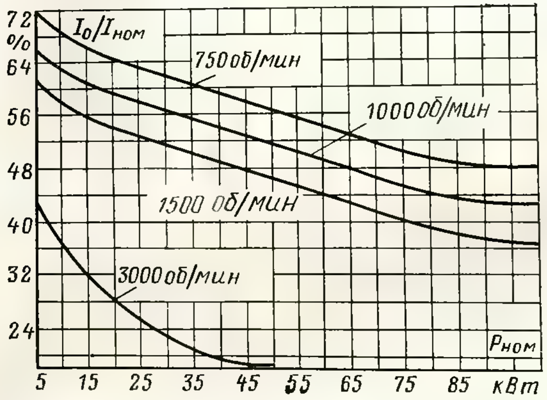


Рис. 29. Кривые предельных значений тока холостого хода трехфазных асинхронных двигателей мощностью 5—100 кВт.

Для проведения опыта собирается схема, показанная на рис. 30. Потенциал-регулятор *2* устанавливают в выведенное положение, включают рубильник *1* и поднимают напряжение до 130% номинального. Вслед за тем потенциал-регулятором снижают напряжение U_0 ступенями: до 120, 110, 100, 90% номинального и т. д., записывая показания приборов (амперметров *3*, ваттметров *4* и вольтметров *5*) на каждой ступени.

Как указано на рис. 30, измерение подводимой мощности производится по схеме двух ваттметров, мощность

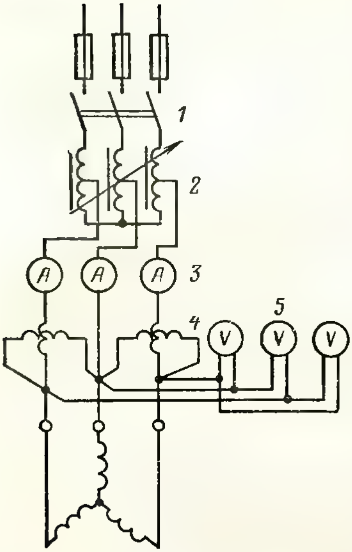


Рис. 30. Схема для опыта холостого хода.

определяется как алгебраическая сумма показаний этих ваттметров. Показания ваттметров одинаковы при $\cos\varphi=1$. При $\cos\varphi=0{,}5\div1$ эти показания различаются между собой, а при $\cos\varphi=0{,}5$ стрелка одного из ваттметров не дает отклонений. Если же $\cos\varphi$ меньше 0,5, то стрелка одного ваттметра отклоняется в обратную сторону и для отсчета необходимо переключить обмотку напряжения ваттметра на обратное направление (поменять местами начало и конец обмотки). У лабораторных ваттметров для этого имеется специальный переключатель. При значениях $\cos\varphi=0{,}5\div1$ измеряемая мощность равна арифметической сумме показаний обоих ваттметров, а при $\cos\varphi$ меньше 0,5 — разности показаний ваттметров. Соотношение показаний ваттметров при разных коэффициентах мощности приведено на рис. 31.

Опыт холостого хода рекомендуется проводить при номинальной частоте $f_{ном}$. Если же во время опыта частота будет отличаться от номинальной и составлять f, то за расчетное значение приложенного напряжения следует принимать U'_0:

$$U'_0=U_0\frac{f_{ном}}{f}.$$

Коэффициент мощности при опыте холостого хода

$$\cos\varphi_0=\frac{P_1}{\sqrt{3}\,U_0I_0}.$$

Для контроля коэффициент мощности определяют по кривой на рис. 31. Совпадение результатов указывает на правильность измерений.

На основании данных замеров строят характеристику холостого хода (рис. 32).

Потери холостого хода слагаются из потерь в обмотке статора $P_м$, суммы потерь в стали $P_с$ и механических потерь $P_{мех}$: $P_м=3I^2_0R$ — при соединении фаз в звезду, $P_м=I^2_0R$, Вт, — при соединении фаз в треугольник, где R — сопротивление при постоянном токе одной фазы.

Сумма $P_с$ и $P_{мех}$ определяется как разность между потерями холостого хода P_0 и потерями в обмотке, т. е.

$$P_с+P_{мех}=P_0-P_м.$$

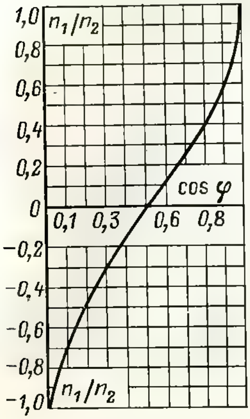


Рис. 31. Определение cos φ по отношению показаний двух ваттметров.

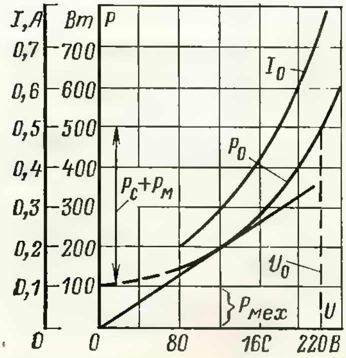


Рис. 32. Пример построения характеристики холостого хода.

Чтобы отделить потери в стали и в обмотке от механических потерь, следует построить кривые зависимостей суммы потерь в стали, в обмотке и механических потерь от приложенного напряжения. Экстраполяция (продолжение) нижней прямолинейной части этой зависимости отсекает на оси ординат механические потери. Можно пользоваться также следующим приближенным способом: через начало координат провести касательную линию к кривой P_0 и замерить ординату в точке касания. Половина ординаты соответствует (в масштабе потерь) механическим потерям. Это построение предложено Л. М. Пиотровским; оно весьма простое, однако не дает точных результатов, так как трудно точно определить точку касания.

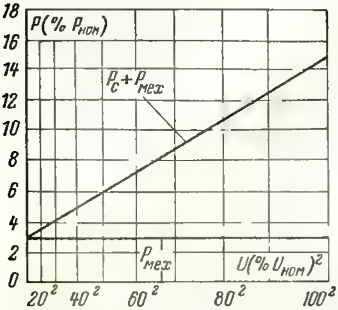


Рис. 33. Построение для более точного определения значения механических потерь.

Если требуется определить значение $P_{мех}$ с большой точностью, следует построить зависимость суммы потерь в стали и механических от квадрата приложенного напряжения, т. е. $P_с + P_{мех} = f(U^2_0)$; эта зависимость представляет собой практически прямую линию и ее пересечения с осью ординат определяет значение $P_{мех}$ с высокой точностью; на рис. 33 показано такое построение, причем по шкале абсцисс отложено U^2_0 в процентах номинального напряжения, а по оси ординат $P_с + P_{мех}$ — то же в процентах номинальной мощности.

Если опыт холостого хода проводят при частоте, отличающейся от номинальной (не более чем на $\pm 2\%$), то потери в стали и механические потери корректируют по следующим формулам:

$$P'_с = P_с \frac{f_{ном}}{f_{ном} + 1{,}5\Delta f};$$

$$P'_{мех} = P_{мех} \frac{f_{ном}}{f_{ном} + 2\Delta f},$$

где $\Delta f = f - f_{ном}$.

Касаясь схемы, приведенной на рис. 30, следует указать, что при больших токах и высоком напряжении подключение приборов приходится производить через трансформаторы тока и напряжения. В связи с тем что при измерении $\cos\varphi$ очень низок, а потребляемый ток в несколько раз меньше номинального тока электродвигателя, не рекомендуется пользоваться обычными трансформаторами тока, так как это может привести к очень большой угловой погрешности трансформаторов. Для большей точности результатов при опыте холостого хода следует применять специальные измерительные трансформаторы, а также специальные малокосинусные ваттметры типа Д542.

12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА И ПОТЕРЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

При проведении опыта короткого замыкания измеряют ток и потери короткого замыкания электродвигателей, проверяют состояние соединений обмоток, а также качество заливки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей. Результаты опыта позволяют определить начальный пусковой ток и начальный вращающий момент электродвигателя, которые являются важными эксплуатационными параметрами.

Опыт короткого замыкания производят при заторможенном роторе. В электродвигателях с фазными роторами обмотку ротора замыкают накоротко на кольцах. При заторможенном роторе к статору подводят практически симметричное напряжение номинальной частоты.

Вращающий момент для электродвигателей мощностью до 100 кВт измеряют динамометром, весами, тормозом или специальными приборами. Так как этот момент может несколько изменяться в зависимости от положения ротора по отношению к статору, то измерения производят несколько раз, сдвигая ротор на одно зубцовое деление, и в качестве результата принимают наименьший из замеренных моментов. Для двигателей мощностью выше 100 кВт вращающий момент обычно определяют расчетным путем по результатам измерения потерь короткого замыкания.

Необходимо учитывать, что при проведении опыта электродвигатель является трансформатором, вторичная обмотка которого (обмотка ротора) замкнута накоротко. Ток, проходящий по обмоткам, может в несколько раз превысить номинальный, а так как двигатель при неподвижном роторе не вентилируется, то его обмотка очень быстро нагревается. Поэтому необходимые отсчеты по приборам и сам опыт надо производить с максимально возможной быстротой. Следует обратить серьезное внимание на надежность устройств, служащих для затормаживания ротора, так как при проведении опыта они испытывают значительные усилия. Направление вращения ротора определяют заранее и, сообразуясь с ним, устанавливают затормаживающие устройства. При ошибке эти устройства могут сорваться и нанести повреждения персоналу.

Опыт короткого замыкания обычно производят сразу после опыта холостого хода. Характеристика короткого замыкания представляет собой зависимость линейного тока короткого замыкания $I_к$ и потерь короткого замыкания $P_к$ от приложенного к статору напряжения $U_к$.

Для проведения опыта собирается схема, аналогичная схеме при опыте холостого хода (рис. 31). При проведении опыта рекомендуется двигатель включать на напряжение, составляющее 15—20% номинального, затем быстро поднимать его до требуемого значения. При типовом испытании следует произвести пять — семь отсчетов при разных значениях подводимого напряжения. Первый отсчет берут при наибольшем напряжении. Отсчеты по приборам при каждом значении подведенного напряжения производят за время не более 10 с во избежание чрезмерного нагрева обмотки током короткого замыкания. После каждого отсчета двигатель отключают.

При типовом испытании двигателя мощностью до 100 кВт опыт проводят, начиная с напряжения, отличающегося от номинального не более чем на ±10%. Типовое испытание короткозамкнутых двигателей мощностью свыше 100 кВт допускается производить при напряжениях, меньших номинального, но при таких, чтобы максимальное значение тока короткого замыкания было не ниже 2,5—4-кратного номинальному. При испытании короткозамкнутых двигателей мощностью свыше 1000 кВт, а также при испытании двигателей с фазным ротором допускается доводить ток только до 2-кратного номинальному. Во всех случаях требуется один из отсчетов произвести при напряжении, указанном ниже.

Номинальное напряжение двигателя, В	127	220	380	500	600	3000	6000
Напряжение короткого замыкания, В	33	58	100	130	173	800	1600

ГОСТ 7217-66 рекомендует при приемо-сдаточных испытаниях ток и потери короткого замыкания определять только при одном напряжении согласно приведенным выше данным с последующим пропорциональным пересчетом тока короткого замыкания на номинальное напряжение двигателя. Потери в этом случае пересчитывают пропорционально квадрату тока. По данным замеров строится характеристика короткого замыкания (рис. 34).

Так же как и при опыте холостого хода, измерение подводимой мощности производится по схеме двух ваттметров. Однако корректировка подводимой мощности на потерю в приборах не производится, так как эти потери обычно лежат ниже уровня погрешности измерения.

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания составляет:

$$\cos\varphi_к = \frac{P_к}{\sqrt{3}\,U_к I_к}.$$

Контроль правильности определения производят по кривой, приведенной на рис. 31. Для определения вращающего момента $M_к$, Н·м*, при коротком замыкании

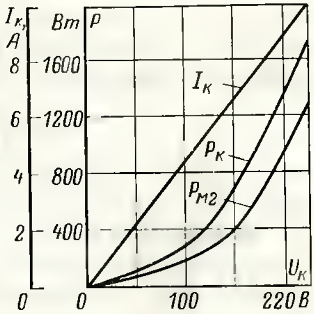


Рис. 34. Пример построения характеристики короткого замыкания.

двигателей мощностью выше 100 кВт следует пользоваться формулой

$$M_к = 9750\frac{P_{км2}}{n_с},$$

где $P_{км2}$ — потери в обмотке ротора при опыте короткого замыкания, кВт; $n_с$ — частота вращения (синхронная), об/мин.

Потери в обмотке ротора $P_{км2}$, кВт, составляют:

$$P_{км2} = P_к - P_{км1} - P_с,$$

где $P_{км1}$ — потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания, кВт, равные: $P_{км1} = 3I^2_к R/1000$ — при соединении фаз в звезду; $P_{км1} = I^2_к R/1000$ — при соединении фаз в треугольник, где R — сопротивление при постоянном токе одной фазы, Ом; $P_с$ — потери в стали,

* 1Н·м = 0,1 кГ·м.

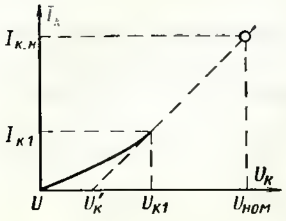


Рис. 35. Графический способ определения тока короткого замыкания при номинальном напряжении.

взятые из опыта холостого хода, при напряжении, равном напряжению короткого замыкания.

При испытаниях в случаях, когда опыт короткого замыкания произведен при напряжении меньше номинального, определение тока короткого замыкания производят следующим образом: проводят касательную к кривой короткого замыкания в точке, соответствующей максимальному замеренному значению (рис. 35). Если эта касательная пересекает ось абсцисс в точке $U'_к$, то ток короткого замыкания $I_{к.н}$, А, при номинальном напряжении, называемый начальным пусковым током, определяется по формуле

$$I_{к.н}=\frac{U_{ном}-U'_к}{U_{к1}-U'_к}I_{к1},$$

где $I_{к1}$ и $U_{к1}$ — соответственно наибольшие ток и напряжение, измеренные в процессе опыта; $U_{ном}$ — номинальное напряжение, В.

Вращающий момент при коротком замыкании, соответствующий номинальному напряжению, называется *начальным пусковым моментом:*

$$M_{к.н}=M_{к1}\left(\frac{I_{к.н}}{I_{к1}}\right)^2,$$

где $M_{к1}$ — вращающий момент при наибольшем напряжении опыта короткого замыкания.

Следует отметить понятия кратность начального пускового тока и кратность начального пускового вращающего момента, определяемые как отношение начального пускового тока или начального вращающего момента соответственно к номинальному току двигателя или номинальному вращающему моменту. Обе эти величины являются нормированными и приводятся в стандартах на соответствующие двигатели.

Значение $I_{к.н}$ должно удовлетворять требованию

$$I_{к.н}\leqslant 1{,}2k_iI_{ном},$$

где k_i — максимально допустимая кратность пускового тока; $I_{ном}$ — номинальный ток электродвигателя; коэф-

фициент 1,2 учитывает установленный ГОСТ 183-74 допуск в сторону увеличения на 20%.

Значения k_i для некоторых двигателей приведены в табл. 8.

Для асинхронных двигателей большей мощности, а также специального исполнения значения k_i указаны в соответствующих стандартах и технических условиях; здесь эти данные не приводятся.

Таблица 8

Мощность, кВт	k_i при синхронной частоте вращения, об/мин					
	3000	1500	1000	750	600	500
	Для двигателей серий А и АО с короткозамкнутым ротором					
От 0,6 до 28 включительно	7,0	7,0	6,5	5,5	—	—
От 40 до 100 включительно	6,5	6,5	6,5	5,5	—	—
	Для двигателей серий А2 и АО2					
До 7,5 включительно	7,0	7,0	6,5	6,0	—	—
Выше 7,5	7,0	7,0	7,0	7,0	6,5	—
	Для двигателей 110—1000 кВт общего применения					
До 200 включительно	6,5	6,5	6,0	5,5	5,5	5,5
От 200 до 500	7,0	7,0	6,5	6,0	6,0	5,5
Выше 500	7,0	7,0	7,0	6,5	6,0	—

Величина потерь короткого замыкания (приведенная к номинальному напряжению) должна удовлетворять зависимости

$$P_{к.н} > 0{,}85 k_м P_{ном} - k I^2_{к.н} R_р + P_с,$$

где $k_м$ — установленная в стандартах или технических условиях минимальная кратность начального пускового вращающего момента; $P_{ном}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт; $R_р$ — расчетное сопротивление фазы обмотки статора, т. е. приведенное к температуре 75°С (если двигатель по нагревостойкости изоляции относится к классам А, Е, В) или 115°С (для классов F и H), Ом; $P_с$ — потери в стали электродвигателя при номинальном напряжении, кВт (определяются при опыте холостого хода); 0,85 — коэффициент, учитывающий допуск 15% в сторону снижения, установленный ГОСТ 183-74 на значение кратности начального пускового вращающего момента; k — коэффициент, равный

0,003 при соединении обмотки статора в звезду или 0,001 при соединении в треугольник.

Значения $k_м$ для двигателей серий А и АО определяют по табл. 9, для двигателей серий А2 и АО2 — по табл. 10, для двигателей мощностью 110—1000 кВт $k_м$ равен 0,9 для двух- и четырехполюсных и 1,0 для шести-, восьми-, десяти- и двенадцатиполюсных. Для остальных двигателей значения $k_м$ указаны в соответствующих стандартах и технических условиях и здесь не приводятся.

Таблица 9

Мощность, кВт	Электродвигатели защищенного исполнения				Электродвигатели закрытого обдуваемого исполнения			
	при синхронной частоте вращения, об/мин							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
0,6	—	1,7	—	—	—	1,7	—	—
1,0	1,8	1,8	1,3	—	2,0	1,8	1,3	—
1,7	1,8	1,8	1,3	—	1,8	1,8	1,3	—
2,8	1,6	1,8	1,3	—	1,8	1,8	1,3	—
4,5	1,6	1,4	1,3	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
7	1,5	1,4	1,1	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
10	1,5	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
14	1,2	1,2	1,2	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
20	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
28	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
40	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,4	1,3
55	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3
75	1,0	1,0	1,0	—	1,1	1,1	—	—
100	1,0	1,0	—	—	1,1	1,1	—	—

Таблица 10

Мощность, кВт	$k_м$ для двигателей серии А2, АО2 при синхронной частоте вращения, об/мин					Мощность, кВт	$k_м$ для двигателей серии АО2 при синхронной частоте вращения, об/мин				
	3000	1500	1000	750	600		3000	1500	1000	750	600
0,4	—	—	1,8	—	—	10	1,5	1,4	1,2	1,2	—
0,6	—	1,8	1,8	—	—	13	1,5	1,3	1,2	1,1	—
0,8	1,9	1,8	1,8	—	—	17	1,2	1,3	1,2	1,1	1,1
1,1	1,9	1,8	1,8	—	—	22	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1
1,5	1,8	1,8	1,8	—	—	30	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1
2,2	1,8	1,8	1,8	1,2	—	40	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
3,0	1,7	1,8	1,3	1,2	—	55	1,0	1,1	1,1	1,1	—
4,0	1,7	1,5	1,3	1,2	—	75	1,0	1,1	1,1	—	—
5,5	1,6	1,5	1,3	1,2	—	100	1,0	1,1	—	—	—
7,5	1,6	1,4	1,3	1,2	—	125	1,0	—	—	—	—

Во время проведения опыта короткого замыкания на пониженном напряжении представляется удобная возможность проверить исправность обмотки короткозамкнутого ротора. Это особенно важно для роторов с литыми алюминиевыми обмотками, в которых часто встречаются пороки литья — пузыри, трещины, обрывы стержней, которые трудно обнаружить при наружном осмотре.

Проверка заключается в том, что при включении обмотки статора на трехфазное напряжение, пониженное настолько, что ротор еще не вращается, а ток настолько мал, что не вызывает заметного перегрева обмоток, ротор медленно проворачивают вручную и следят за показанием трех амперметров, включенных в фазы статора. Если обмотка ротора исправна, его проворачивание не вызывает изменения показаний амперметров; при неисправном роторе стрелки амперметров поочередно колеблются, и тем заметнее, чем больше неисправность.

13. ИСПЫТАНИЕ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

Это испытание производят только при приемо-сдаточных испытаниях отремонтированных асинхронных двигателей с фазным ротором и только при ремонте или замене бандажей. Испытание производят для проверки прочности вращающихся частей под действием центробежных сил; в основном проверяют качество бандажей, стягивающих лобовые части обмотки ротора. Согласно ГОСТ 183-74 двигатели должны выдержать без повреждений и остаточных деформаций повышение частоты вращения на 20% сверх номинальной в течение 2 мин (специальные электродвигатели, крановые, металлургические подвергаются более серьезным испытаниям, предусмотренным в стандартах). Повышение частоты вращения двигателя можно осуществить разными способами; наиболее простой из них — от другого двигателя с помощью ременной передачи и шкивов нужного диаметра или с помощью редуктора.

При испытании необходимо принять меры безопасности — удалить из опасной зоны всех людей и предметы, которые могут пострадать от разлетающихся обрывков бандажей ротора. Впрочем, для обычных конструк-

ций закрытых и защищенных двигателей разрыв роторных бандажей локализуется внутри корпуса машины. Повышение частоты вращения следует производить плавно, плавно следует понижать и частоту до полной остановки по истечении срока испытания, что проще всего осуществить отключением питания приводного двигателя.

Не следует измерять повышенную частоту вращения ручным тахометром непосредственно на валу испытуемого двигателя, так как это подвергает измеряющего опасности. Рекомендуется использовать всякого рода дистанционные измерители или вибрационные частотомеры, располагаемые на щите или укрепленные на корпусе испытуемого двигателя (показания таких частотомеров с помощью бинокля видны с большого расстояния).

После окончания испытания должен быть произведен тщательный осмотр машины, измерено биение контактных колец и т. д.

14. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

При ремонте и эксплуатации двигателей измерение температуры обмотки и других частей двигателя, а также охлаждающего воздуха производят термометрами расширения, термопарами и терморезисторами. Для измерения температуры обмоток часто пользуются и косвенным методом — измерением их сопротивления при постоянном токе.

Термометры расширения применяют для измерения температуры доступных мест двигателя — поверхностей корпуса и подшипников, лобовых частей обмотки и др., а также для измерения температуры окружающей среды и окружающего воздуха, поступающего и выходящего из двигателя. Применяют как ртутные, так и спиртовые термометры. Вблизи сильных переменных магнитных полей следует применять только спиртовые термометры. Применение ртутных термометров в этих случаях противопоказано, так как в ртути наводятся вихревые токи, искажающие результаты замера.

Следует отдать предпочтение так называемым палочным толстостенным термометрам, имеющим цилинд-

рическую форму и сравнительно небольшие размеры по высоте и, что важно, по диаметру (6—7 мм). Это делает возможным установку этих термометров в труднодоступных местах. Не рекомендуется пользоваться хвостовыми термометрами, где ртуть или спирт помещаются в тонком длинном резервуаре на его конце. Эти термометры дают правильные показания только при полном погружении резервуара в среду, температура которой измеряется (масло, вода, воздух), а не при прикосновении к твердым предметам (корпус двигателя, лобовые части обмотки и др.).

Для лучшей передачи тепла от нагретого места к термометру резервуар термометра обертывают фольгой (очень тонким листовым алюминием или свинцом) таким образом, чтобы получился комок, который затем плотно прижимают к нагретому месту. Для теплоизоляции термометра поверх фольги накладывают слой ваты или войлока, но так, чтобы последний не попал между термометром и нагретой частью электродвигателя. При измерении температуры охлаждающего воздуха (охлаждающей среды) термометр следует поместить в закрытый металлический стаканчик, заполненный маслом и защищающий термометр от лучистой теплоты, испускаемой окружающими источниками тепла и самой испытываемой машиной, и от случайных потоков воздуха.

При измерении температуры наружной охлаждающей среды несколько термометров располагают в разных точках вокруг испытываемой машины на высоте, равной половине высоты машины, и на расстоянии 1—2 м от нее. За температуру охлаждающей среды принимают среднее арифметическое значение показаний этих термометров.

Термопары являются удобными и широко применяемыми датчиками (индикаторами) температуры. С их помощью можно измерять как температуру на поверхности нагретых тел, так и температуру труднодоступных мест двигателя в сердечниках стали и в пазовой части обмотки.

Термопару образуют две изолированные друг от друга проволоки из разных материалов; материалы выбирают в зависимости от значений измеряемой температуры. Для измерения температур в электрических машинах обычно применяют медно-константановые термопары, состоящие из медной и константановой проволок диамет-

ром около 0,5 мм. Одна пара концов термопары спаяна между собой. Места спая обычно помещают в ту точку, где желают измерить температуру («горячий» спай), а другую пару концов подключают либо непосредственно к зажимам чувствительного милливольтметра с большим внутренним сопротивлением, либо к переходной сборке зажимов, от которой отходят медные проводники к измерительному прибору. В том месте, где ненагреваемый конец константановой проволоки соединяется с медным проводником (на клемме измерительного прибора или на переходной клемме), образуется так называемый «холодный» спай термопары.

На поверхности контакта двух металлов (константана и меди) возникает э. д. с., пропорциональная температуре в месте контакта, причем на константане образуется *минус* (—), а на меди *плюс* (+). Само собой понятно, что э. д. с. возникает как на «горячем», так и на «холодном» спае термопары, однако поскольку температуры этих спаев разные, то и значения э. д. с. различны, а так как в контуре, образованном термопарой и измерительным прибором, эти э. д. с. направлены навстречу друг другу, то милливольтметр всегда измеряет разность э. д. с. «горячего» и «холодного» спаев, которая соответствует разности температур.

Если «горячий» спай медно-константановой термопары нагреть до 100°С, а «холодный» поместить в среду, температура которой 0°С, то результирующая э. д. с. составит 4,16 мВ. При уменьшении разности температур э. д. с. будет снижаться пропорционально этой разности. Из этого следует, что э. д. с. медно-константановой термопары составляет 0,0416 мВ на 1°С разности температур «горячего» и «холодного» спаев. В соответствии с этим можно отградуировать и шкалу милливольтметра непосредственно в градусах Цельсия.

Так как термопара фиксирует только разность температур между «горячим» и «холодным» спаями, то для определения абсолютной температуры «горячего» спая следует к показаниям термопары по милливольтметру (выраженным в градусах) прибавить температуру «холодного» спая, обычно замеряемую термометром.

Термопары изготовляют обычно своими силами: проволоки скручивают между собой на длине 6—8 мм и после их тщательной зачистки спаивают чистым оловом (без кислоты) или сваривают.

При сварке (рис. 36,*а*) скрученные и зачищенные концы захватывают плоскогубцами с изолированными ручками. Напряжение от трансформатора 12 В подводят к губке плоскогубцев и к угольному электроду. При прикосновении электрода к скрутке концы проволок оплавляются, образуя шариковую головку, как это указано на рис. 36,*б*. При надобности эту головку в горячем виде проковывают легкими ударами молотка, при этом образуется плоская лопатообразная головка термопары. Та-

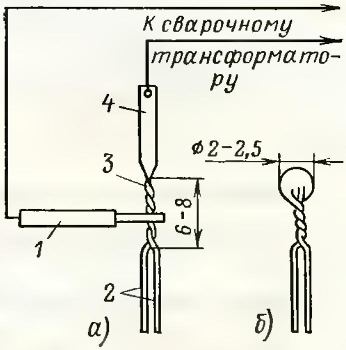


Рис. 36. Сварка концов термопары.

а — процесс сварки; *б* — головка термопары; *1* — плоскогубцы с изолированными ручками; *2* — провода термопары; *3* — скрутка; *4* — угольный электрод.

кие термопары применяют для измерения температуры сердечников стали, для чего листы сердечника раздвигают ножом и в образовавшуюся щель плотно вставляют головку термопары. Место закладки термопары должно быть надежно защищено от конвекционных потоков воздуха.

Для измерения температуры в пазовой части обмотки термопары закладывают при двухслойной обмотке между верхними и нижними сторонами катушек, а при однослойной обмотке — между клином и катушкой. В первом случае при укладке обмоток термопару помещают в межслойную пазовую прокладку, во втором случае — в желобок, вырезанный во внутренней стороне пазового клина.

Часто в двигатель закладывают несколько термопар для измерения температуры различных частей двигате-

[1] В соответствии с ГОСТ 11828-75 для электрических машин мощностью до 10 кВт (кВ·А) устанавливают один термометр или температурный индикатор, для машин мощностью от 10 до 100 кВт (кВ·А) включительно — не менее двух, для машин от 100 до 1000 кВт (кВ·А) — не менее трех и для машин мощностью свыше 1000 кВт (кВ·А) — не менее четырех.

ля, которые поочередно подключают к одному милливольтметру с помощью переключателя или штепсельной вилки (рис. 37). Конструкция переключателя должна обеспечивать отсутствие контакта между термопарами при переходе от одной термопары к другой; в противном случае стрелка милливольтметра будет испытывать сильные толчки.

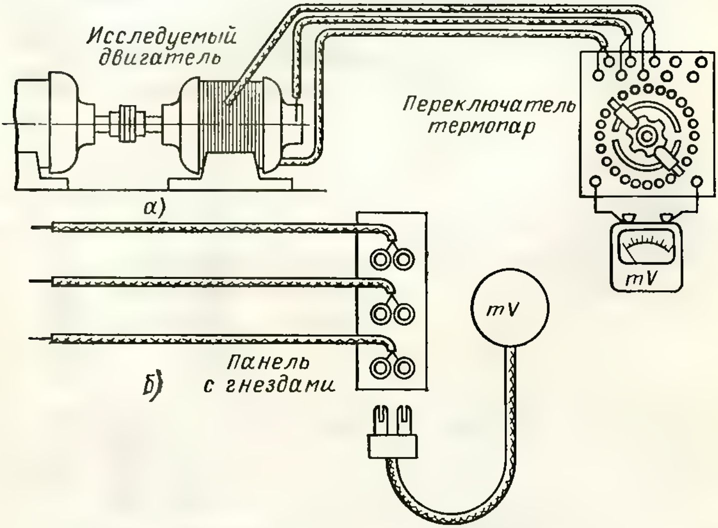


Рис. 37. Измерение температуры термопарами.
а — по схеме с переключателем; *б* — по схеме со штепсельной вилкой.

Порядок градуировки милливольтметра с термопарами имеет существенное значение для точности измерения. Необходимо помнить, что отклонение стрелки милливольтметра зависит от внутреннего сопротивления и падения напряжения в контуре термопары. Когда милливольтметр подсоединяют только к одной термопаре, его градуировка не вызывает затруднений и производится, как указано ниже. Если к милливольтметру подсоединяют через переключатель несколько термопар, которые часто имеют разные внутренние сопротивления, градуировка усложняется. В этом случае приходится либо градуировать милливольтметр с каждой термопарой в отдельности и строить для каждой термопары свою градуировочную кривую, либо уравнивать внутрен-

ние сопротивления термопар, чтобы получить единую градуировку.

Для равенства сопротивления всех термопар, подключаемых к одному милливольтметру, необходимо изготовить их из одной партии проволоки с равной длиной концов. Помимо этого, термопары должны быть выверены между собой. Для взаимной выверки все «горячие» спаи термопар погружают в закрытый сосуд с нагретым до 70—80°С трансформаторным маслом и быстрым переводом ручки переключателя определяют, какая из термопар дает максимальные показания на милливольтметре; эту термопару принимают за контрольную. Вслед за тем концы термопар, показания от которых меньше, укорачивают таким образом, чтобы показания от них на милливольтметре сравнялись с показанием контрольной термопары.

Для градуировки термопар с милливольтметром их «горячие» спаи погружают в сосуд с маслом, нагретым до 100°С. Для измерения температуры масла в сосуд погружают также термометр. «Холодные» спаи термопар погружают в сосуд с тающим льдом. При медленном охлаждении масла через каждые 5—10°С записывают показания милливольтметра до тех пор, пока температура масла в сосуде не сравняется с температурой охлаждающего воздуха. На основании записей температуры масла и показаний милливольтметра строят градуировочную кривую.

Для обеспечения точности измерения необходимо выбирать милливольтметр с большим внутренним сопротивлением. Желательно, чтобы внутреннее сопротивление милливольтметра не менее чем в 100 раз превышало сопротивление контура термопары, включая соединительные провода. Кроме того, необходимо обеспечить хорошие контакты во всем контуре, так как при плохих контактах показания милливольтметра снижаются.

Когда при измерении стремятся определить не абсолютную температуру в тех местах, где заложены «горячие» спаи термопар, а превышение их температуры над температурой охлаждающего воздуха, целесообразно поместить «холодные» спаи термопар в зоне или камере охлаждающего воздуха. В этом случае показания милливольтметра непосредственно определяют искомое превышение температуры и поправку на температуру «холодного» спая не вносят. Иногда применяют искус-

ственные схемы для непосредственного определения абсолютных температур без необходимости внесения поправок на температуру «холодного» спая.

Одна из таких схем представлена на рис. 38; медные провода всех термопар обозначены жирными линиями, а константановые — более тонкими. В схему включена дополнительная (контрольная) термопара, спай которой помещен в сосуд с тающим льдом. По приведенной схеме проверяют также термопары при сомнениях в правильности их показаний. Для этого в сосуд наливают масло и помещают в него термометр. При медленном нагревании масла показание милливольтметра будет равно нулю, когда термометр покажет температуру, совпадающую с температурой «горячего» спая проверяемой термопары, заложенной в двигатель.

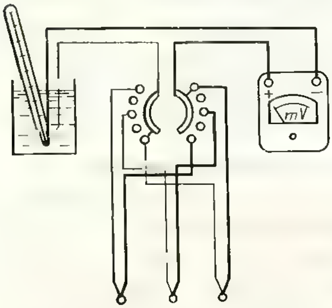


Рис. 38. Схема измерения температуры с контрольной термопарой.

Терморезисторы. Способ измерения температуры с помощью терморезисторов основан на общеизвестном свойстве металлов — увеличении их сопротивления при постоянном токе при повышении температуры. Способ удобен тем, что позволяет определить непосредственно абсолютную температуру нагретого места.

Терморезисторы представляют собой тонкую медную проволоку, намотанную на полоске или цилиндрическом основании. Сопротивление проволоки при постоянном токе при температуре 0°С обычно подбирают равным 53 Ом. Значения сопротивления этой проволоки при других температурах приведены в табл. 11.

Сопротивление измеряют либо мостом постоянного тока, либо к сопротивлению подключают постоянное или выпрямленное напряжение и специальным точным прибором магнитоэлектрической системы — логометром (ЛПБ-46) измеряют ток. Шкала логометра градуируется непосредственно в градусах Цельсия. Напряжение питания составляет 4 В. В отличие от схемы с термопарами плохие контакты в контуре терморезисторов увеличивают показания логометра.

Терморезисторы закладывают в различных частях двигателя и поочередно подключают к логометру переключателем. Этот переключатель отличается от применяемого при измерении термопарами тем, что в нем при переходе с одного контакта на другой происходит разрыв цепи питания. В противном случае в момент замыкания и размыкания контактов переключателя имели бы место броски тока, вредно влияющие на подвижную систему логометра.

Таблица 11

Температура, °С	Сопротивление, Ом	Температура, °С	Сопротивление, Ом
0	53,00	75	69,89
5	54,13	80	71,02
10	55,25	85	72,15
15	56,38	90	73,27
20	57,51	95	74,40
25	58,63	100	75,53
30	59,76	105	76,65
35	60,88	110	77,78
40	62,01	115	78,90
45	63,14	120	80,03
50	64,26	125	81,16
55	65,39	130	82,28
60	66,52	135	83,41
65	67,64	140	84,54
70	68,77	150	86,79

Для правильной работы установки теплоконтроля необходимо, чтобы не только сопротивления термоиндикаторов были одинаковы, но и совпадали между собой сопротивления соединительных проводов между логометром и термоиндикатором (терморезистором). Для этого в схеме установки предусматривают катушки с эталонным и подгоночным сопротивлениями.

Обычно логометры рассчитаны на то, что сопротивление соединительных проводов равно 5 Ом; к этому значению и подгоняют сопротивление соединительных проводов.

По конструкции терморезисторы могут быть плоские, предназначаемые для закладки в пазы, и цилиндрические — для измерения температуры жидкости, газов, а также для установки во вкладыши подшипников. Терморезисторы первого вида наматывают на текстолитовую

пластинку и защищают оболочкой из бакелизированной бумаги и микашелка. Терморезисторы второго вида наматывают на медный или текстолитовый стержень и закладывают в герметический металлический футляр.

На рис. 39 приведена заводская схема установки терморезисторов для крупного двигателя.

Определение температуры обмоток по их сопротивлению постоянному току основано на упомянутом выше свойстве металлов изменять свое сопротивление в зависимости от температуры.

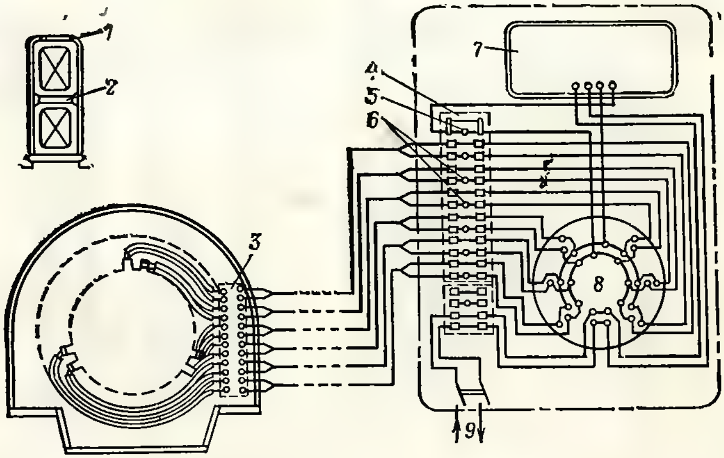


Рис. 39. Схема включения логометра и расположение термометров сопротивления.

1 — измерение температуры стали; 2 — измерение температуры обмотки; 3 — доска зажимов термометров сопротивления; 4 — панель с эталонной и подгоночными катушками; 5 — эталонная катушка; 6 — подгоночные катушки; 7 — логометр; 8 — переключатель; 9 — к источнику постоянного тока.

Преобразуя приведенную ранее формулу, определяющую эту зависимость, можно записать:

$$\theta = \vartheta_г - \vartheta_0 = \frac{R_г - R_х}{R_х}(235 + \vartheta_х) + \vartheta_х - \vartheta_0,$$

где θ — превышение температуры над температурой охлаждающей среды, °С; $\vartheta_г$ — температура обмотки в нагретом состоянии, °С; $\vartheta_х$ — температура обмотки практически в холодном состоянии, °С; ϑ_0 — температура охлаждающей среды, °С; $R_г$ — сопротивление обмотки в нагретом состоянии, Ом; $R_х$ — сопротивление обмот-

ки, измеренное практически в холодном состоянии, т. е. при температуре ϑ_x, Ом.

Формула относится к обмоткам, изготовленным из меди. Для алюминиевых обмоток число 235 в формуле следует заменить на 245. Под охлаждающей средой для двигателя подразумевается продуваемый через него или окружающий его воздух.

Следует учитывать, что от момента отключения двигателя до начала замеров сопротивления его обмотки проходит некоторое время, в течение которого обмотка успевает несколько остыть. Поэтому для правильного определения температуры обмоток в момент отключения, т. е. в рабочем состоянии двигателя, поступают следующим образом.

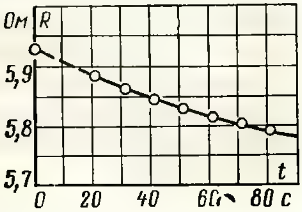


Рис. 40. График изменения сопротивления обмотки при остывании.

После отключения машины по возможности через равные (точно измеряемые по секундомеру) промежутки времени производят несколько (но не меньше трех) измерений сопротивления. Промежуток времени между измерениями не должен превышать времени, прошедшего от момента выключения машины до момента проведения первого измерения сопротивления.

Первое измерение сопротивления обмотки производят не позднее чем через 1 мин от момента отключения для машины мощностью до 10 кВт, через 1,5 мин — для машин мощностью 10—100 кВт и через 2 мин — для машин мощностью выше 100 кВт.

Если первое измерение сопротивления выполнено не более чем через 15—20 с от момента выключения, то за сопротивление принимают наибольшее из первых трех измеренных. Если первое измерение произведено позднее чем через 20 с после отключения машины, то вносят поправку на остывание. Для этого производят шесть — восемь измерений сопротивления и строят график изменения сопротивления обмотки при остывании (рис. 40).

По оси абсцисс откладывают (точно в масштабе) время, прошедшее от момента выключения машины до первого измерения, и промежутки между измерениями (с), а по оси ординат — соответствующие измеренные

сопротивления и получают кривую зависимости (изображена сплошной линией). После этого продолжают кривую влево, сохраняя характер ее изменения, до пересечения с осью ординат (изображена пунктирной линией). Отрезок на оси ординат от начала координат до точки пересечения с пунктирной кривой с достаточной точностью определит искомое сопротивление обмотки двигателя.

Следует учитывать, что при определении температуры обмоток по способу замера их сопротивления определяется средняя температура обмоток. В действительности же при работе двигателя отдельные зоны обмоток, как правило, имеют разную температуру; максимальная температура обмоток, определяющая сохранность изоляции, всегда несколько превышает среднее значение.

15. ИСПЫТАНИЕ НА НАГРЕВАНИЕ

Испытание на нагревание производят приложением к двигателю непосредственной нагрузки, равной его номинальной мощности, при номинальном напряжении до практически установившейся температуры отдельных частей двигателя, т. е. до такого состояния, когда в течение последнего часа испытания температура охлаждающей или окружающей среды, а также все измеряемые температуры частей машины изменяются не более чем на 1°С.

Для нагрузки асинхронного двигателя при его испытании на нагревание допустимы различные методы; наиболее простые из них — это различные тормоза (колодочный, ленточный и т. д.), а также нагрузка при помощи генератора, работающего на реостат.

При применении этих методов энергия, расходуемая при испытаниях, теряется безвозвратно.

Существуют схемы испытаний на нагревание, при которых бо́льшая часть используемой энергии возвращается в сеть. Естественно, что эти схемы более предпочтительны, однако испытательные устройства при этом усложняются и удорожаются, поэтому в испытательных схемах электроремонтных предприятий такие установки применяются редко.

Если определение установившейся температуры обмотки производится методом экстраполяции путем построения кривой остывания после отключения двигателя, то для асинхронных двигателей с фазным ротором построение приходится производить дважды: один раз для обмотки статора и второй раз для обмотки ротора, для чего двигатель после построения кривой остывания обмотки статора вторично приводят во вращение с прежней нагрузкой до установления прежних температур и затем вторично отключают.

Испытание на нагревание иногда проводят не при номинальной нагрузке, а при некотором токе $I_н$, который может несколько отличаться от тока I, соответствующего номинальной нагрузке; в этих случаях измеренное превышение температуры обмотки можно пересчитать по формуле

$$\theta' = \left(\frac{I}{I_н}\right)^2 \theta,$$

где θ' — искомое превышение температуры обмотки при номинальной нагрузке.

Целью испытания отремонтированного электродвигателя на нагревание является сравнение установившейся температуры его частей при номинальной нагрузке с нормами, установленными ГОСТ 183-74. Это испытание производят только в тех случаях, когда при ремонте изменены электромагнитные нагрузки двигателя (плотность тока, магнитный поток), в частности, при измерении мощности или частоты вращения двигателя.

ГОСТ 183-74 нормирует не температуру, а превышение температуры какого-то тела (или части тела), т. е. разность между его температурой и температурой окружающей среды. Поэтому при испытании на нагрев необходимо измерять не только температуры частей испытываемого двигателя, но и температуру охлаждающей среды. В машинах с принудительной вентиляцией за температуру охлаждающей среды принимают температуру входящего в машину охлаждающего воздуха (или газа), в остальных машинах — температуру окружающего воздуха.

Например, если при испытании электродвигателя на нагревание измеренная температура обмотки равна 100°С, а измеренная температура воздуха, входящего в машину (при принудительной вентиляции) или окру-

Таблица 12

Части двигателя	Предельно допустимые превышения температуры, °С, при изоляционных материалах класса нагревостойкости					Метод измерения температуры
	A	E	B	F	H	
Обмотки переменного тока двигателей 5000 кВ·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	60	70	80	100	125	Сопротивления или температурных индикаторов, уложенных в паз. Данные — вне зависимости от метода измерения
То же, но менее 5000 кВ·А или с длиной сердечника менее 1 м	50*	65*	70**	85**	105***	Термометра или сопротивления. Данные приведены для измерения методом термометра
Стержневые обмотки роторов асинхронных двигателей	65	80	90	110	135	Термометра или сопротивления. Данные—вне зависимости от метода измерения
Контактные кольца	60	70	80	90	110	Термометра или температурных индикаторов, уложенных в пазы
Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с обмотками	60	75	80	110	125	Термометра
То же, не соприкасающиеся с обмотками	Превышение температуры этих частей не должно превышать значений, которые создавали бы опасность повреждения изоляционных или других смежных материалов					

* При измерении методом сопротивления допускаемая температура увеличивается на 10°С.
** То же на 15°С.
*** То же на 20°С.

жающего машину (при отсутствии принудительной вентиляции), 30°С, то превышение температуры обмотки равно 100°С—30°С=70°С.

В табл. 12 приведены предельно допускаемые превышения температур частей двигателя, причем для одной и той же части приведены разные нормы в зависимости от класса нагревостойкости изоляции двигателя. Остановимся на этом вопросе несколько подробнее.

Все электроизоляционные материалы, применяемые в конструкциях электрических машин, стареют и постепенно теряют электрическую и механическую прочность. Скорость этого старения зависит главным образом от температуры, при которой изоляция работает.

При рассмотрении различных изоляционных материалов с точки зрения длительности срока службы при различных температурах было установлено, что их можно разделить на несколько классов по нагревостойкости таким образом, что материалы, относящиеся к одному классу, имеют примерно одинаковый срок службы, когда они работают при одинаковых температурах.

Для каждого класса нагревостойкости установлена характерная для этого класса предельная температура, при которой изоляция работает длительно и при превышении которой срок службы изоляции резко сокращается.

Согласно ГОСТ 8865-70 установлены следующие классы нагревостойкости электроизоляционных материалов и характерные для них предельные температуры:

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Предельная температура, °С	90	105	120	130	155	180	Выше 180

Все изоляционные материалы очень чувствительны к высоким температурам. Многочисленными опытами установлено, что долговечность (срок службы) изоляции уменьшается вдвое, если температура, при которой она работает, на 6—8°С превосходит предельную, характерную для данного класса нагревостойкости изоляции (правило Монтзингера).

В электродвигателях применяют электроизоляционные материалы, относящиеся к указанным ниже клас-

сам нагревостойкости, а именно А, Е, В, F, Н и С; для различных классов нагревостойкости в табл. 12 приведены предельно допускаемые превышения температуры частей электродвигателя.

ГОСТ 8865-70 следующим образом относит изоляционные материалы, применяемые в конструкциях электрических машин, к указанным классам нагревостойкости:

класс А — пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, натурального, синтетического или искусственного шелка; сюда относятся бумаги, картоны, ткани из хлопчатой бумаги, искусственного и натурального шелка и большинство органических пленок и эмалей;

класс Е — некоторые синтетические органические пленки, теплостойкие эмали, пластмассы с органическим заполнителем;

класс В — материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами; сюда относятся миканит с его модификациями, стеклолакоткани, асбестовые бумаги и ткани;

класс F — материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами;

класс Н — материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами;

класс С — материалы на основе стекла, слюды, кварца, применяемые без связующих.

Зная, из каких изоляционных материалов выполнена при ремонте изоляция электродвигателя, можно определить, к какому классу нагревостойкости она относится, и выбрать по табл. 12 соответствующее предельно допускаемое превышение температуры. При этом необходимо учитывать, что класс нагревостойкости изоляции двигателя в целом определяется по примененному в конструкции изоляции материалу с наиболее низким классом нагревостойкости. Например, если для пазовой изоляции применен материал на основе слюды класса В, а для обмотки — провод ПБД с хлопчатобумажной изоляцией класса А, то двигатель

по классу нагревостойкости изоляции относится к классу А.

Нормы, приведенные в табл. 12, зависят не только от класса нагревостойкости изоляции, но и от примененного метода измерения температур. Причины этого, а также описание различных методов измерения температуры, применяемых при испытании на нагревание, изложены в § 14.

Нормы, приведенные в табл. 14, относятся к двигателям, работающим при температуре охлаждающей среды 40°С и на высоте над уровнем моря не более 1000 м.

Для закрытых машин на напряжение не более 1500 В предельно допускаемые превышения температуры обмоток статоров электродвигателей мощностью менее 5000 кВ·А или с длиной сердечника менее 1 м, а также стержневых обмоток роторов при измерении температур методом сопротивления допускается повышать на 5°С.

Если температура охлаждающей среды находится в пределах 40—45°С, предельно допускаемые превышения температуры, указанные в табл. 12, снижаются для всех классов изоляционных материалов на 5°С, а при температурах охлаждающей среды в пределах 45—50°С — на 10°С.

Если температура охлаждающей среды ниже 40°С, то для всех классов изоляции допускаемые превышения температуры могут быть увеличены на столько градусов, на сколько температура охлаждающей среды ниже 40°С, но не более чем на 10°С.

ГОСТ 183-74 предусматривает также некоторое изменение предельных допускаемых температур для электродвигателей на номинальное напряжение выше 11 000 В и при установке выше 1000 м над уровнем моря. Здесь эти указания не приводятся.

При пользовании табл. 12 следует учитывать, что упомянутый в ней термин «метод термометра» для измерения температур включает все измерения, когда можно прикладывать измерители к доступным поверхностям частей электрической машины и определять температуру в той точке поверхности, к которой они приложены. С этой точки зрения к методу термометра относятся измерения температуры на доступных поверхностях, когда они производятся не только термо-

метрами расширения, но и другими измерителями, если только эти измерители прикладывают к поверхности части машины (например, поверхностные термопары). Кроме того, сюда же относятся и измерения температуры охлаждающей среды, которые могут выполняться как термометрами расширения, так и термопарами и термометрами сопротивления.

Очевидно, что в результате измерения по методу термометра нельзя учесть более высокие температуры внутри нагретого тела. Поэтому, когда требованиями стандартов или технических условий допускается измерение температуры не только методом термометра, но и другими методами, которые в той или другой степени учитывают и температуру внутри нагретого тела, допускаемые предельные температуры неодинаковы, и как правило, для измерения методом термометра они ниже.

16. ИСПЫТАНИЕ НА КРАТКОВРЕМЕННУЮ ПЕРЕГРУЗКУ ПО ТОКУ

Согласно требованиям ТУ 16-519-002-71 в объем типовых испытаний отремонтированных двигателей, если при ремонте изменены мощность или частота вращения, входит кратковременная перегрузка по току. Перегрузку на 50% двигателя мощностью 0,55 кВт и выше должны выдержать без повреждений и остаточных деформаций в течение 2 мин.

Не всегда удается осуществить перегрузку по току на 50% при номинальном напряжении, поэтому допускается на это время несколько снизить напряжение; однако следует помнить, что при сильном снижении напряжения вращающий момент двигателя резко уменьшается и двигатель может остановиться.

17. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ МАРКИРОВКИ ВЫВОДНЫХ КОНЦОВ ОБМОТКИ

Все вновь отремонтированные двигатели должны иметь такое же обозначение (маркировку) выводов обмотки, как и новые двигатели.

Маркировка концов обмотки статора трехфазных асинхронных двигателей в соответствии с ГОСТ 183-74 приведена в табл. 13.

Маркировка выводов обмотки ротора указана в табл. 14.

Контактные кольца обозначают так же, как и присоединенные к ним выводы обмотки ротора, при этом расположение колец должно быть в порядке цифр, указанных в таблице, а кольцо P_1 должно быть наиболее удаленным от обмотки ротора. Обозначение самих колец буквами необязательно.

Таблица 13

Схема соединений обмотки	Число выводов	Название вывода	Обозначение вывода	
			Начало	Конец
Открытая схема	6	Первая фаза	C_1	C_4
		Вторая фаза	C_2	C_5
		Третья фаза	C_3	C_6
Соединение звездой	3 или 4	Первая фаза	C_1	
		Вторая фаза	C_2	
		Третья фаза	C_3	
		Нулевая точка	0	
Соединение треугольником	3	Первый зажим	C_1	
		Второй зажим	C_2	
		Третий зажим	C_3	

Таблица 14

Число выводов на контактных кольцах	Название вывода	Обозначение вывода
3	Первая фаза	P_1
	Вторая фаза	P_2
	Третья фаза	P_3
4	Первая фаза	P_1
	Вторая фаза	P_2
	Третья фаза	P_3
	Нулевая точка	0

Все двигатели, имеющие устаревшую, ранее применяемую маркировку выводов (например, H_1, H_2, H_3, K_1, K_2, K_3 или X, Y, Z, U, V, W и др.), при ремонте должны быть перемаркированы.

Правильность обозначения начала и конца обмотки проверяют следующим образом.

Две обмотки фаз соединяют последовательно и включают под напряжение, равное 10—15% номинального. Третью обмотку фазы присоединяют к вольтмет-

ру. Если показание вольтметра равно нулю, то находящиеся под напряжением обмотки соединены одноименными выводами (т. е. началами или концами). Затем обмотку, включенную на вольтметр, заменяют одной из обмоток, включенных под напряжение, и, аналогичным способом повторяя опыт, находят, какой ее вывод является одноименным с ранее определенным.

18. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНЫХ (РУДНИЧНЫХ) ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

Ремонт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования, в частности асинхронных электродвигателей, производится по правилам, установленным руководящими техническими материалами — РТМ 16.689.169-75; эти правила предусматривают, что этот вид ремонта могут производить только специализированные ремонтные предприятия (цехи, участки), полностью подготовленные и оснащенные для этой цели, имеющие специальное разрешение на производство таких работ и зарегистрированные в органах Госгортехнадзора. Эксплуатационные службы предприятий могут своими силами производить ремонт взрывозащищенных электродвигателей только в ограниченном объеме (если ремонт не может повлечь за собой нарушения взрывозащиты) и при наличии специального разрешения. Разрешения выдаются при соблюдении ряда требований, в частности, если ремонтные службы оснащены необходимым испытательным оборудованием.

Особенностью испытаний взрывозащищенных (рудничных) электродвигателей при ремонте является обязательное проведение в процессе ремонта гидравлических испытаний взрывобезопасных оболочек по инструкции, приведенной в РТМ 16.689.169-75; испытания должны производиться на специальном стенде. Кроме того, программа электрических испытаний и нормы, которым должны удовлетворять отремонтированные двигатели, отличаются от вышеприведенных данных на общепромышленные электродвигатели и устанавливаются ремонтной документацией на конкретное изделие,

19. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТОВ

Для обеспечения безопасности персонала, производящего испытания электродвигателей, необходимо соблюдать строгие меры предосторожности.

Помимо обычных мер для персонала, обслуживающего электротехнические установки (пользование изолирующими ковриками, диэлектрическими перчатками и т. д.), необходимы и специальные меры безопасности, связанные с технологией проведения испытаний.

После окончания измерения мегаомметром сопротивления изоляции каждой электрически независимой цепи обмотки с номинальным напряжением 3 кВ и выше необходимо каждую цепь соединить с заземленным корпусом машины на время не менее 15 с при мощности машины до 1000 кВт (кВ·А) и не менее 1 мин — при более высокой мощности; в противном случае заряды, накопленные в обмотках, могут сохраняться долгое время и привести к поражению персонала при прикосновении к выводам.

При испытании электрической прочности изоляции обмоток возникает повышенная опасность поражения персонала испытательным напряжением, поэтому испытания должны проводиться на специально огороженном участке, снабженном сигнальными лампами и блокировками, устроенными таким образом, что испытательное напряжение не может быть подано, пока на испытательном поле находится человек и входная дверь на участке не заперта. Это же правило должно соблюдаться и при испытаниях крупных машин, отремонтированных на месте установки. В этих случаях применяются переносные ограждения с блокировками и сигнальными лампами, развешиваются предупреждающие сигналы и вокруг огражденной площади устанавливают посты охраны.

В процессе испытания, особенно при испытаниях выпрямленным напряжением, обмотка получает высокие заряды, поэтому для обеспечения безопасности персонала необходимо после испытания разряжать испытанную обмотку на заземленный корпус машины в течение не менее 5 мин.

При испытании междувитковой изоляции пробой изоляции сопровождается вспышкой с выбрасыванием

капель расплавленного металла. Это явление обычно происходит тем интенсивнее, чем крупнее испытываемая машина. Для предохранения от поражения необходимо при этом испытании удалять персонал из зоны расположения машины на достаточно большое расстояние.

При испытаниях при повышенной частоте вращения следует принимать меры предосторожности против возможного поражения персонала при обрывах проволочных бандажей (при фазных роторах) или при отрывах частей вентиляторов, а при опыте короткого замыкания — при срыве затормаживающих устройств. При этих испытаниях также необходимо удалять персонал из опасной зоны.

При испытаниях активной стали статора следует опасаться появления высоких потенциалов на обмотках, корпусе статора и измерительных приборах, поэтому место испытания огораживают, вывешивают предупредительные плакаты, отсчеты по приборам ведут, не прикасаясь к ним.

При измерениях коэффициента трансформации возможно появление на обмотках высоких напряжений, поэтому прикосновение к обмоткам опасно.

Заземление обмоток с целью отведения зарядов, накопленных во время испытаний, необходимо производить с помощью специальной изолирующей штанги. Наконечник штанги сначала заземляют (подсоединяют к корпусу), а потом касаются наконечником обмотки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баннов С. Е.** Ремонт электрооборудования металлургнческих заводов. — М.: Металлургия, 1975. — 424 с.

2. **Вниоградов Н. В.** Производство электрических машин. — М.: Энергия, 1970. — 288 с.

3. **Жерве Г. К.** Руководство для электромонтеров по испытаиию электрических машин. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1955. — 283 с.

4. **Жерве Г. К.** Расчет асинхроиного двигателя при перемотке.— Л.: Эиергия, Ленингр. отд-ние, 1967. — 148 с.

5. **Жерве Г. К.** Промышлеиные испытания электрических машин. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергия, Лениигр. отд-ние, 1968. — 573 с.

6. **Коварскнй Е. М.** Ремонт электрических машин. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960. — 264 с.

7. **Минин Г. П.** Измерение мощности. — М.: Эиергия, 1965. — 96 с.

8. **Рубо Л. Г.** Пересчет и ремонт асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 392 с.

9. **Рубо Л. Г., Маршак Е. Л.** Моитаж обмоток электрических машин высокого напряжения. — М.—Л.: Энергия, 1964. — 56 с.

10. **Смирнов М. В.** Контроль и испытание обмоток электрических машин и аппаратов. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 176 с.

11. **Третьяков М. Н.** Испытание электродвигателей малой мощности. М.: Энергия, 1966. — 174 с.

12. **Маршак Е. Л., Уманцев Р. Б.** Ремонт электрических машии общепромышленного примеиеиия — М.: Энергия, 1972. — 280 с.

13. **Маршак Е. Л.** Ремонт и модернизация асинхронных двигателей. — М.: Энергия, 1976. — 263 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
1. Общие сведения 4
2. Определение размеров электродвигателя. Измерение зазоров 9
3. Испытание активной стали статора 15
4. Измерение сопротивления изоляции 20
5. Измерение сопротивления обмоток при постоянном токе 28
6. Проверка правильности соединения схемы и наличия вращающегося поля 36
7. Испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса электродвигателя и между обмотками 37
8. Испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток 42
9. Определение коэффициента трансформации 51
10. Обкатка электродвигателя 53
11. Определение тока и потерь холостого хода 54
12. Определение тока и потерь короткого замыкания . . . 59
13. Испытание при повышенной частоте вращения 65
14. Измерение температуры 66
15. Испытание на нагревание 76
16. Испытание на кратковременную перегрузку по току . . 82
17. Проверка правильности маркировки выводных концов обмотки 82
18. Особенности испытаний взрывобезопасных (рудничных) электродвигателей при ремонте 84
19. Меры безопасности при проведении ремонтов 85
Список литературы 87

Нисим Моисеевич Слоним

ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

Редактор И. М. Райхлин
Редактор издательства И. А. Сморчкова
Обложка художника Т. Н. Хромовой
Технический редактор В. В. Хапаева
Корректор М. Г. Гулина
ИБ № 11

Сдано в набор 30.11.79 Подписано в печать 12.02.80 Т-01064 Формат 84×108 1/32
Бумага типографская № 1 Гарн. шрифта литературная. Печать высокая
Усл. печ. л. 4,62 Уч.-изд. л. 4,51 Тираж 25 000 экз. Заказ 382 Цена 25 к

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

25 к.

Еще больше электротехнической литературы на
www.bibl-em.narod.ru